

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES PARA SU INCORPORACIÓN EN REVESTIMIENTOS BASADOS EN LA TIERRA PROYECTADA

Trabajo Fin de Grado

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

Universidad de Granada

ALUMNA:

VIVIANA ANDREA VALENCIA CASTRO

TUTORES:

DRA. RAQUEL FUENTES GARCÍA

DR. IGNACIO VALVERDE PALACIOS

DR. IGNACIO VALVERDE ESPINOSA

2018/2019

INDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO
3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO
 - 3.1 Tipo de Residuos y Reciclaje de neumáticos fuera de uso
 - Definición Polvo de Caucho
 - Obtención del Polvo de Caucho
 - Proceso SIGNUS. Tratamiento de NFU. Granulometría
 - Aplicaciones de los NFU. Reciclaje. Obra Civil. Valorización Energética
 - 3.2 Solución alternativa de revestimiento en la construcción con material de caucho de NFU y serrín de eucaliptus
 - 3.3 Paneles Aislantes de sonido elaborados con Hormigón y adición de polvo de NFU
 - 3.4 Tierra Proyectada
4. METODOLOGÍA
 - 4.1 De campo
 - 4.1.1 Toma de muestras de tierra en yacimiento Formación Alhambra/coluvial de la Formación Alhambra / Suelos meteorizados de la misma formación
 - 4.1.2 Recepción e identificación del caucho suministrado por la empresa SIGNUS
 - 4.2 De Laboratorio
 - 4.2.1 Ensayos de identificación
 - 4.2.1.1 Físicos:
 - Textura y Plasticidad
 - Humedad Higroscópica
 - Ensayos de compactación. Proctor normal
 - 4.2.1.2 Químicos
 - Pruebas de carbonatación con fenolftaleína
 - Ensayo en cámara de carbonatación acelerada
 - 4.2.1.3 Mecánicos:
 - Ensayo de rotura a compresión simple en probetas
 - 4.2.2 Proyecciones
 - 4.2.2.1 Tipo de soporte
 - 4.2.2.2 Tipo de maquinaria para la aplicación de las mezclas en el soporte.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

La idea de encontrar algo que pueda aportar, sensibilizando a quien sea partícipe de ello, a quien tenga la curiosidad o de alguna forma quiera seguir la línea que se abre con esta investigación, es la forma más directa que tenemos de dar ese granito de arena al mundo, ya que no se puede cambiar el mundo, qué menos que empezar por ti y brindar al mundo un uso paralelo a los residuos, dejando de ser residuos y colaborando a formar parte de algo más grande. He aquí la base de este estudio, una introducción más allá de la puesta en obra de un elemento tradicional adaptado a la actualidad y mejorado por nuestros propios residuos, esa es la idea.

Diariamente nos vemos invadidos de conceptos como “sostenibilidad” o “sustentabilidad”, sin ser del todo conscientes de lo que esto implica y la necesidad de reconvertir el pensamiento, buscando de forma eficiente una reinterpretación de nuestros sistemas constructivos convencionales, adaptándolos al presente y potenciando sus características físicas y mecánicas con los residuos que se generan por parte de la industria, juego en el que ya muchas personas han intentado aportar pero pocos han conseguido aportar mediante estos una mejora a las propiedades.

Como punto de partida se ha hecho un análisis general a nivel autonómico Andaluz con la intención de tener una lista de los diferentes residuos industriales según su importancia y volumen. Se ha obtenido la información de la Consejería de Medio ambiente y Ordenación del Territorio, en el apartado de residuos y recursos naturales. Para una mayor precisión se ha dado una clasificación codificada por el Catálogo Europeo de Residuos (LER). Para esta clasificación ha de tenerse en cuenta:

Los diferentes tipos de residuos de la lista se clasifican mediante códigos de seis cifras para los residuos, y de cuatro y dos cifras para los subcapítulos y capítulos respectivamente.

Para localizar un residuo en la lista se deberá proceder de la manera siguiente:

Localizar la fuente que genera el residuo en los capítulos 01 a 12 o 17 a 20 y buscar el código apropiado de seis cifras para el residuo (excluidos los códigos finalizados en 99 de dichos capítulos). Nótese que algunas unidades de producción específicas pueden necesitar varios capítulos para clasificar sus actividades: por ejemplo, un fabricante de automóviles puede encontrar sus residuos en los capítulos 12 (residuos del moldeo y del tratamiento de superficie de metales y plásticos), 11 (residuos inorgánicos que contienen metales procedentes del tratamiento y del recubrimiento de metales) y 08 (residuos de la utilización de revestimientos), dependiendo de las diferentes fases del proceso de fabricación. Nota: los residuos de envases recogidos selectivamente

(incluidas las mezclas de materiales de envase diferentes) se clasificarán con el código 15 01, no el 20 01.

3.2. Si no se encuentra ningún código de residuo apropiado en los capítulos 01 a 12 o 17 a 20, se deberán consultar los capítulos 13, 14 y 15 para localizar el residuo.

Ejemplo:

01 RESIDUOS DE LA PROSPECCION, EXTRACCION DE MINAS Y CANTERAS Y TRATAMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS DE MINERALES

01 01 Residuos de la extracción de minerales

01 01 01 Residuos de la extracción de minerales metálicos

De donde se ha obtenido la siguiente lista de residuos industriales:

02 01 01 Lodos de lavado y limpieza

02 01 04 Residuos de envases y embalaje

02 02 Residuos de la industria agroalimentaria

02 04 (Residuos de la elaboración del azúcar) Espumas de azucarera

02 04 02 Carbonato cálcico

02 05 02 Lodos de tratamiento de efluentes

03 01 05 Serrín, Virutas, Recortes de madera, Tablones

03 03 02 Lodos de lejía de cocción de pasta de papel

Colorantes y Pigmentos

04 02 16* Colorantes y pigmentos que contienen sustancias peligrosas

04 02 17 Colorantes y pigmentos distintos de los mencionados en el código 04 02 16

Residuos de fibras textiles

04 02 21 Residuos de fibras textiles no procesadas

04 02 22 Residuos de fibras textiles procesadas

08 01 Disolventes, Barnices, Pinturas

08 03 Tintas de impresión

08 04 Adhesivos y sellantes

Soluciones de revelado

09 01 01* Soluciones de revelado y soluciones activadoras al agua

09 01 02* Soluciones de revelado de placas de impresión al agua

09 01 03* Soluciones de revelado con disolventes

09 01 05 Fijado y blanqueo

10 02 02 Escorias

Absorbentes, Trapos y Aceites minerales

15 02 02 Absorbentes, materiales de filtración (incluidos los filtros de aceites no incluidos en otra categoría)

15 02 03 Absorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropas protectoras distintos de los especificados en el código 15 02 02

Una segunda lista ha sido también parte del estudio determinada por "Residuos específicos"

17. Residuos de construcción y demolición

02 01 04 Residuos de plásticos agrícolas

16 01 03 Neumáticos fuera de uso

20 01 39 Bolsas de plástico [1]

Haciendo un barrido general de todos los residuos como productos o subproductos de la industria se han valorado con especial ímpetu:

16 01 03 Neumáticos fuera de uso

04 02 21 Residuos de fibras textiles tanto procesadas o no procesadas

Para el concepto de esta investigación se optó por en un principio estudiar dos variantes diferentes, por una parte los NFU (Neumáticos Fuera de Uso) el cual se desarrollará a lo largo de esta investigación; por otra parte, se tuvo en cuenta los Residuos Textiles, del cual no se llegó al mismo nivel de detalle pero si se logró una recopilación de información de gran ayuda.

La industria textil es la segunda más contaminante del mundo. Y a pesar del cambio que ha sufrido en los últimos años, con la eliminación de la mayoría de los componentes químicos peligrosos de sus procesos de producción, sigue generando el 3% del dióxido de carbono del mundo, lo que supone unos 850 millones de toneladas. Sin embargo, es consciente de esta situación y está haciendo grandes esfuerzos para cambiar su perfil medioambiental, aumentando la proporción de materiales reciclados para la fabricación de la prendas, cambiando las materias primas que más dañan al medio ambiente por otras más respetuosas, y buscando soluciones de reciclaje a las prendas finales. Se trata de formar parte de la economía circular, aunque aún tiene un largo camino que recorrer.

En el marco europeo se han dado dos clasificaciones diferentes a los residuos de la industria textil dependiendo de su tratamiento, las cuales son:

04 02 Residuos de la industria Textil

04 02 21 Residuos de fibras textiles no procesadas

Se clasifica como un residuo no peligroso

Tipos de residuos

- | | |
|--|---|
| - Remolque abacá, borras y desperdicios de hilados de fibra acrílica | animales |
| - Pelo Animal | - Fibras textiles (sin procesar) sintéticos |
| - Fibra de carbón | - Fibra- acrílico |
| - Algodón | - N/o/s textiles |
| - Cojines | - Poliéster |
| - Residuos de Polímeros | - Polímeros sintéticos |
| - Fibras textiles (sin procesar) de | - Fibras textiles (sin procesar) mixtas |

04 02 22 Residuos de fibras textiles procesadas

Se clasifica como un residuo no peligroso

Tipos de residuos:

- | | |
|--|--|
| - Remolque abacá, borras y desperdicios de hilados de fibra acrílica | - Textil- algodón |
| - Fibra de carbón | - Espuma de caucho |
| - Alfombras | - Geotextiles |
| - Algodón | - Yute |
| - Lana de algodón | - Lino |
| - Cojines | - Colchones |
| - Fibra acrílico | - Barras de lana |
| - Fibras textiles (procesada) sintéticos | - Nylon |
| - Fibra sintéticas | - N/o/s textiles |
| - Desperdicios de seda | - Poliéster |
| - Residuos de fibra sintética | - Polímeros sintéticos |
| - Fibras textiles (procesada) de animales | - Fibras textiles (procesadas) mixtas |
| - Fibras textiles (procesada) sintéticos | - Fibras textiles (procesadas) vegetales |
| | - Textil-Lana |
| | -Lana |

[1]

Al igual que se hizo con los residuos de los neumáticos se hizo un barrido general de posibles colaboraciones que pudiesen contribuir a la investigación, pero antes, se llegó como punto de partida al CITYC. El Centro de Información Textil y de la Confección (Cityc), es un organismo sin ánimo de lucro creado en 1993 por el Consejo Intertextil Español (CIE) y que cuenta con el apoyo de las principales asociaciones textiles.

El Cityc tiene como objetivo proporcionar a los principales grupos de interés del sector textil-confección los elementos informativos necesarios para su desarrollo.

Estos son los servicios que ofrece:

- Estadísticas de mercado, producción y comercio exterior
- Datos macroeconómicos estructurales y coyunturales
- Normativa legal
- Información y asesoramiento en la tramitación de ayudas a la industria
- Consultas generales relacionadas con el sector
- Boletín periódico de comercio exterior y coyuntura del textil – confección. [2]

BIBL.[1]<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portaIweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=5d492f287a6ad310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=7ff8e9e6e31ad310VgnVCM2000000624e50aRCRD> (datos obtenidos de la consejería de agricultura, ganadería, pesca y desarrollo sostenible de la Junta de Andalucía)

BIBL.[2] <http://consejointertextil.com/informacion-estadistica-cityc/> (información obtenida de la página general del consejo intertextil)

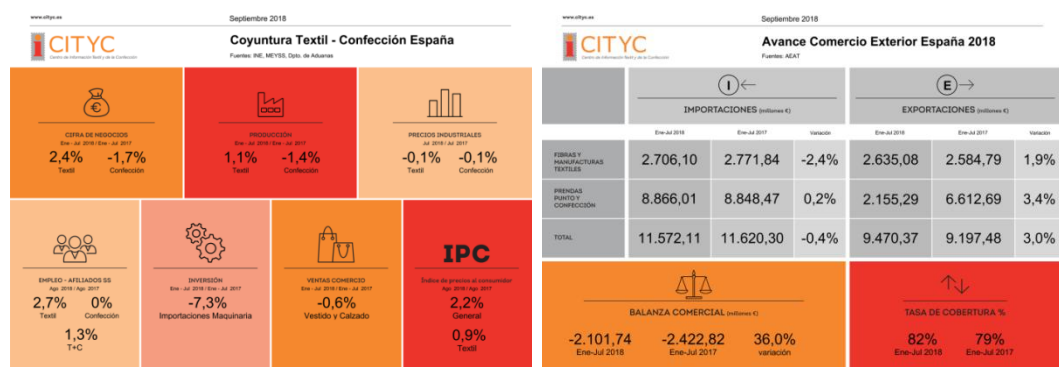


Fig 1. Datos obtenidos de la página oficial del CITYC

Como colaboración se logró un amplio contacto con la empresa conocida mundialmente INDITEX. De los cuales se obtuvo la siguiente información:

El residuo textil se genera en el proceso de corte de los patrones que posteriormente son enviados a talleres para su confección y obtención de la prenda final. El proceso de corte se realiza en grandes mesas sobre la que se estiran los rollos de tejido y se procede al corte, con la mayor eficiencia posible, pero por la forma de los patrones es imposible aprovechar más del 90% de la superficie y, por lo tanto, se pierde entre el 10 y el 15% del total.

Estos trozos que quedan son de todas las medidas y formas y sin un proceso posterior no se pueden volver a utilizar en ningún proceso.

Lo que hacen las empresas que se lo llevan es hacer una selección por composiciones, lo que es mono material y de origen natural, por ejemplo algodón o lana, lo envían a empresas especializadas que lo reciclan, lo que es multimaterial, que es la mayoría, normalmente las empresas especializadas lo trocean, deshilachan y se usa en rellenos, aislamientos.

[3]

Objetivos del reciclaje textil:

- Disminuir la contaminación en general y el consumo de energía.
- Utilizar menos combustibles fósiles en su producción.
- Reducir el volumen de residuos sólidos en los vertederos.
- Ahorrar materia prima virgen.

Procesos de reciclaje

Los residuos textiles también pueden ser utilizados para la elaboración de nuevas materias primas. Para ello se necesita clasificar por tipos de fibras (lana, poliéster, algodón, seda, nylon, etc.) para posteriormente desmontarlas y volver a hilar. De esa manera los nuevos hilados pueden ser usados por el sector de la confección para la fabricación de piezas nuevas.

BIBL.[3] Información obtenida por el contacto directo con INDITEX

Los materiales son varios y de diferentes composiciones, y en nuestro sector, el de moda, depende mucho de las tendencias. A final de año, da como resultado total que los porcentajes vienen rondando: ALGODÓN 50-60%, POLIESTER 20-30%; VISCOSA> 5-10% y otras muchas materias primas como POLIURETANO, POLIAMIDA, ACRILICO, PIEL VACUNA, LANA, ELASTANO, LYOCELL, LINO..... todos ya en porcentajes pequeños pero casi siempre aparecen en los tejidos mezclados, de ahí lo difícil de tener una material tipo y de suministro constante.

Los residuos de materiales textiles se pueden clasificar como:

Post-industriales: subproductos de hilados y tejidos para el sector de la fabricación y venta de todo tipo de productos textiles.

Post-consumo: que provienen de prendas de vestir, de artículos textiles para el hogar y otros productos textiles de usos específicos por ejemplo los tapizados para automotores, las alfombras, etc. Que luego de su uso se desechan. **[3]**

Etapas del reciclaje

a. *Clasificación*: los textiles recolectados se clasifican de forma manual y se separan según su condición y los tipos de materias primas (fibras utilizadas) que los componen.

– Textiles que se pueden reutilizar: Zapatos y piezas de indumentaria que se revenden tal cual están.

– Textiles que no se pueden reutilizar: Se re introducen al proceso industrial textil para ser desfibrados y volver a comenzar el proceso textil (hilados).

b. *Desfibrado*: Los materiales textiles se “trituran” y se convierten nuevamente en fibras. Dependiendo de cuál sea la utilización final, se pueden incorporar mezclas con otras fibras.

c. *Cardado*: Las fibras obtenidas se someten al proceso de cardado para limpiar y mezclarse.

d. *Hilatura*: El material se hila y queda así preparado para posteriores procesos de tejeduría. Por lo general este tipo de hilados son de títulos más gruesos ya que el largo de las fibras no es lo suficientemente largo para lograr hilados finos.

Por otra parte, y no menos importante se promovió el uso de la Tierra proyectada como sistema de construcción base, se eligió este con la intención de usar un material natural, que aportando las características físicas y mecánicas pudiese mejorar o dar un valor añadido al sistema, además de esto a forma de dar continuidad a la línea de investigación del laboratorio de materiales de construcción para promover el uso de residuos industriales para su incorporación en revestimientos basados en tierra proyectada. **[4]**

BIBL.[4] Información obtenida de la página <http://reciclario.com.ar/indice/textiles/>

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

- 2.1 Reutilizar residuos industriales en la construcción, en nuestro caso, Polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso, mezclados con tierra y conglomerantes basándonos en la patente de TIERRA PROYECTADA.
- 2.2 Estudiar propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales y de sus mezclas, y en base a ello establecer el grado de idoneidad resultante de mezcla de tierra + residuo de caucho
- 2.3 Estudiar en el sistema constructivo de tierra proyectada de la posibilidad de incorporar residuos de neumáticos fuera de uso, sin afectar a sus buenas propiedades, e incluso que pudieran mejorarlas.

3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1 Tipos de Residuos y Reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso

16 01 03 Neumáticos fuera de uso

Se puede localizar como fuente de residuo en el apartado 16 Residuos no especificados en otro capítulo de la lista, en el subapartado 16 01 Vehículos de diferentes medios de transporte (incluidas las máquinas no de carretera) al final de su vida útil y residuos del desguace de vehículos al final de su vida útil y del mantenimiento.

En los últimos años, España ha sido el encargado de producir 200.000 Tn de neumáticos, de los cuales Andalucía ha producido entre 35.000 y 40.000 de ese total.

La generación de NFU tiene dos orígenes principalmente:

- Neumáticos de reposición: el que viene de reemplazar los neumáticos usados de un vehículo
- Neumáticos obtenidos en el proceso de desguace de un vehículo fuera de uso (VFU).

Actualmente se plantea un aprovechamiento de estos mediante la obtención de “polvo de caucho” la cual es mayormente utilizada en la construcción de carreteras y en suelos especiales para parques infantiles o instalaciones deportivas. El acero se recupera de los neumáticos para su reutilización.

El Real decreto 1619/2005, 30 de Diciembre regula la gestión de neumáticos fuera de uso, en donde impone obligaciones a los productores de neumáticos o todo quien las fabrique.

Puntos significativos:

- La obligación de los productores de presentar planes empresariales de prevención de neumáticos fuera de uso y de alcanzar los objetivos ecológicos sobre los neumáticos que ponen en el mercado nacional de reposición.
- La identificación de los agentes implicados, productores, generadores,

poseedores y gestores, así como sus responsabilidades

- La prohibición de eliminar en vertederos neumáticos troceados a partir de Julio de 2006
- La regulación de los sistemas integrados de gestión de neumáticos fuera de uso. [1]

Toneladas ANDALUCÍA	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PEM	40742	38161	36375	35355	32809	28128	31965	34550	33947
Recogido	41770	38973	36757	39170	36039	31889	31921	36577	38924
Reutilizado	2920	3478	3072	3535	5779	4495	6621	5668	4917
NFU	38851	35495	33685	35635	30260	27394	25300	30908	34007
Valorización material	29238	44721	18574	19859	26351	20060	16587	13653	27934
Valorización energética	7400	11855	7160	27944	21864	8905	14667	17178	4361

Tabla 1. Obtenida de la consejería de agricultura, ganadería, pesca y desarrollo sostenible de la Junta de Andalucía

Con la intención de encontrar una metodología experimental, se estudiaron casos similares para ver desde una perspectiva científica global hasta qué punto se había llegado. Por esta razón se tomaron como base dos ensayos, trabajos académicos por parte de dos distintos autores, con el fin de encontrar una base razonable para proceder a crear un procedimiento experimental.

Definición Polvo de Caucho

El **Polvo de Caucho** proviene de la trituración mecánica de los NCFU que se hace mediante un sistema de maquinaria especializado. Este se encarga de separar todos los componentes de los Neumáticos, dejando los textiles, el acero y el caucho agrupados de forma independiente, de modo que resulta un "Polvo y granulado de caucho" 99% libre de impurezas.

Se caracteriza por ser un material que se presenta en forma de gránulos (4mm aprox) o polvo (partículas más pequeñas), y dependiendo de su granulometría la aplicación posterior que tendrá. El tamaño de las partículas puede ser elegido en la maquinaria de modo que esta produzca el adecuado para el uso designado. [5]

Obtención del Polvo de Caucho

Con la intención de encontrar una empresa colaboradora con el fin de obtener material base para la experimentación, se contactó con empresas de gran renombre encargadas de la fabricación y puesta en venta de neumáticos como: **Neumáticos continental, Michelin, Pirelli, Bridgestone y Goodyear**. Los cuales derivaron a una empresa común llamada **SIGNUS**.

BIBL [5] Definición tomada de : <http://geneu.com.uy/polvo-de-caucho-otras-aplicaciones/>

SIGNUS Es uno de los sistemas integrados de gestión (SIG) de neumáticos usados que funciona en España. Como entidad sin ánimo de lucro, gestiona y promueve el reciclado de los neumáticos fuera de uso (NFU). Creado por las empresas fabricantes e importadoras de neumáticos en 2005, comprende, además de la gestión, una labor de investigación y desarrollo de nuevas aplicaciones y mercados para los productos resultantes. [6]



Fig 2. Composición y consumo petrolífero de neumáticos. SIGNUS. 2015

Proceso SIGNUS.

• TRATAMIENTO DEL NFU

La complejidad de los materiales que componen un neumático implica complicados procesos de reciclado. Por ello, innovadores procesos de tratamiento para la separación/descomposición de los diferentes componentes (caucho, acero y textil) son clave para un eficiente reciclado de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU). Así, una vez que los NFVU llegan a las plantas de tratamiento, se someten a diferentes procesos:

Trituración

Los neumáticos enteros se introducen en una trituradora que generalmente se compone de un conjunto formado por uno o dos rotores o ejes de cuchillas que giran en sentido contrario para cortar el NFVU. Dependiendo de las dimensiones de las cuchillas y de la criba que se coloque a la salida de la trituradora, se obtienen trozos de NFVU de entre 20 y 400 mm.

Granulación

En una primera etapa, el triturado de NFVU puede reducirse a tamaños de hasta por debajo de 25 mm mediante diferentes tipos de molinos. Además, durante ese proceso se separan prácticamente la totalidad del acero y parte del textil.

BIBL [6] Definición obtenida de la página oficial de la empresa
<https://www.signus.es/sobre-signus/>

El material de caucho que no se ha separado para su comercialización en el proceso anterior se introduce bien en uno o varios molinos de granulación donde se consiguen tamaños por debajo de 10 mm o bien, en un molino de finos directamente para obtener polvo de caucho de tamaño inferior a 0,8 mm.

Separación de Acero y Fibra Textil

La separación del acero y las fibras textiles se lleva a cabo normalmente durante la granulación, aunque en algunas ocasiones, también en la trituración (dependiendo del diseño de cada planta). El acero se retira mediante separadores magnéticos. Por otro lado, aprovechando su textura y ligereza, la separación de la fibra textil se puede llevar a cabo mediante cintas balísticas o mesas vibratorias que combinan la separación del caucho por tamizado con dispositivos fluido-dinámicos basados en corrientes de aire o ciclones.

• GRANULOMETRÍA

Cada una de las diferentes etapas de transformación de los NFVU junto con diversas configuraciones del equipamiento utilizado permiten obtener productos finales de diferentes tamaños.

Triturado

El triturado de NFVU se obtiene de la transformación del NFVU entero, combinando en su composición los tres componentes (50-150 mm).

CHIP

Es un material granular de geometría irregular formado solo por dos componentes: caucho y textil, al haber eliminado ya en este paso la mayor parte del acero presente en el neumático.

El tamaño de las partículas está comprendido entre los 12 mm y 24 mm.

Granulado y Polvo

La granza de caucho es uno de los tres productos que se obtienen en la granulación, proceso donde se descompone el neumático en sus tres componentes básicos: el caucho junto con acero y el textil. Por ello, la composición del granulado tiene una eliminación casi completa de textil y acero. [7]



Fig. 3 Triturado de neumáticos



Fig. 4 CHIP de neumáticos



Fig. 5 Granulado y Polvo de neumáticos

[7] Proceso e imágenes aportadas por la empresa, documento adjunto nº2



Fig. 6 Tamaños: POLVO <1 mm; GR1 0,8-2 mm; GR2 2- 4 mm;
GR3 4-8 mm

Aplicaciones de los NFU

Entre los diferentes usos que se les da a los NFU, podemos hacer una clasificación en 3 grandes grupos:

- **Reciclaje**

Reductores de altura de ola. Combinando diversas disposiciones de varios neumáticos sobre una estructura, se construyen unos sencillos sistemas que consiguen reducir la altura de las olas en aguas interiores (de puertos por ejemplo) u otras ubicaciones marítimas de condiciones moderadas.

Barreras New jersey. Dentro del proyecto New Jersey, financiado por el programa LIFE+ de la Comisión Europea, se ha desarrollado y homologado una barrera de seguridad de hormigón en la que se incorpora caucho procedente del neumático sustituyendo parte de los áridos que contiene el hormigón. Esto supone una reducción en el peso de cada módulo de la barrera que tiene un efecto muy positivo en la huella de Carbono del producto.

Aplicación ornamental. El neumático reciclado y granulado es usado también en la construcción de jardines o rotondas. Puede aplicarse una coloración especial para el fin ornamental y su principal beneficio deriva en la reducción de agua de riego que supone su uso en lugar de un jardín tradicional.

Suelo de calzado. La utilización de caucho reciclado en la fabricación de suela de calzado se realiza principalmente por incorporación del polvo fino de este material. Su utilización se suele limitar a mezclas oscuras debido al negro de carbono que contiene el caucho.

Barreras de protección de circuitos. Gracias a la gran capacidad de absorber energía y de su gran resistencia a la intemperie, el neumático entero es un elemento muy usado actualmente en la construcción de

barreras de protección de barcos y muelles e incluso en circuitos automovilísticos. Los neumáticos seleccionados para este fin deben atender al cumplimiento de normativas específicas como la de la Federación Internacional de Automovilismo (FIA).

Pantallas acústicas. La gran capacidad de absorción de vibraciones de los materiales procedentes del neumático, así como su alta estabilidad ante agentes atmosféricos, permite que se pueda utilizar como láminas de aislamiento acústico.

Mezclas bituminosas. Se trata de mezclas que incorporan polvo de neumático en su formulación y derivan en un material muy eficiente para la reducción del agrietamiento de las carreteras, el alargamiento de la vida en servicio y de otras mejoras en materia de seguridad, como propiedades relacionadas con un mejor drenaje del agua, ya que permite la formulación de mezclas abiertas o drenantes.

Suelos de seguridad y parques infantiles. El empleo de nuestros materiales reciclados cumple con los parámetros de seguridad establecidos por normativa europea, evitando lesiones de los más pequeños a la vez que permite su mezcla con aglomerantes y pinturas que convierten a estas áreas en lugares llamativos y seguros.

Fabricación de piezas de caucho. Existen en el mercado numerosas piezas fabricadas en su totalidad con caucho procedente del neumático utilizando resinas de poliuretano como aglomerante. Además, el polvo de neumático puede utilizarse como carga de refuerzo en mezclas de caucho virgen para la fabricación de nuevas piezas.

Rellenos de césped artificial. Representa uno de los usos principales del caucho reciclado, dotando a las instalaciones de mayor confort y seguridad, a la vez que supone un importante ahorro en el consumo de agua.

Sistemas de protección para motoristas. Aprovechando las ventajas de absorción de energía que tiene el neumático, la empresa Vialmarco ha desarrollado un sistema de protección para motoristas basado en una estructura metálica que contiene una serie de cilindros móviles fabricados con caucho reciclado procedente del neumático. El sistema funciona absorbiendo la energía del impacto, reconduciendo la trayectoria del accidentado a lo largo del arcén, evitando así el retorno a la calzada y un posible alcance por el vehículo posterior

Pistas acuestres. Los materiales procedentes del neumático, como el chip, granulado o textil, se utilizan de diferentes formas en pistas ecuestres para conseguir las propiedades deseadas en este tipo de suelos, como

son la elasticidad, amortiguación y que haya un buen sistema de drenaje para mantener la humedad de la pista en las condiciones óptimas.

- **Obra Civil**

Construcción de taludes. Los neumáticos utilizados en la construcción de taludes evitan el uso de materiales como hormigón y piedras, a la vez que impiden el desmoronamiento del terreno con la ventaja de permitir el crecimiento vegetal y su integración en el entorno, además de simplificar su puesta en obra y la reducción de costes de construcción.

Relleno ligero de terraplenes. El triturado procedente del neumático se puede utilizar como material ligero para rellenar terraplenes contruidos sobre suelos de baja capacidad portante. Derivados de una normativa de referencia internacional, se establecen parámetros de diseño y calidad que aseguran su buen comportamiento.

Balsas de almacenamiento. El neumático entero puede disponerse en capas homogéneas y utilizarse para la construcción de balsas, tanto de infiltración para mantener el ciclo hidrológico del agua como de retención para la reutilización del agua almacenada para otros usos.

Relleno de trasdós de muros. La utilización de neumáticos triturados como relleno de trasdós (partes superiores de muros o bóvedas) reduce el empuje soportado por este muro. Además, incrementa la capacidad de evacuación de las aguas de escorrentía.

Aplicaciones en Ingeniería de vertederos. La ley permite la utilización de neumáticos en vertederos cuando se trata de aplicaciones de ingeniería civil. Tanto los neumáticos enteros como triturados se pueden utilizar en diversas aplicaciones alineadas con estas estructuras.

Protección del revestimiento impermeable. El neumático entero se puede utilizar para proteger la geomembrana tanto en el fondo del vaso como en los taludes de posibles punzonamientos para garantizar la impermeabilidad del vertedero. Además reduce el impacto de la masa de residuos vertida en el vaso y favorece la recogida de lixiviados en los taludes.

Extracción de biogás. En este caso la alta porosidad del triturado cumple dos objetivos fundamentales, por una parte dirigir el biogás generado hacia la tubería de aspiración gracias a su alto índice de huecos y, por otro, su gran capacidad de absorción de los empujes del propio residuo dentro del vertedero.

Material de drenaje. La alta conductividad hidráulica que presenta el triturado de neumático aporta unas buenas propiedades como material drenante. Esto permite el aprovechamiento del material para la

construcción de diferentes capas estructurales en vertederos como la capa de drenaje de fondos en vertederos y la capa de recogida de aguas superficiales.

Valorización Energética

Producción eléctrica. A través de un proceso de tratamiento térmico de oxidación completa, se aprovecha el contenido energético del neumático para la obtención de energía eléctrica.

Pirólisis. En el proceso de pirólisis los neumáticos se someten a un tratamiento térmico dando lugar a una corriente gaseosa, una fracción líquida y un residuo carbonoso. La distribución de los productos obtenidos y su calidad depende de las condiciones de operación en el reactor y de la tecnología utilizada.

Combustible de sustitución. Coproceso de neumáticos en la industria cementera: La utilización del neumático como combustible sólido recuperado (CSR) en la industria cementera supone algo más que un aprovechamiento energético ya que un porcentaje importante de sus componentes se incorporan al 'clinker' constituyendo por tanto un proceso mixto o de coproceso del neumático. Además, entre sus beneficios están la reducción de emisiones de SOx respecto a combustibles tradicionales, una disminución de emisiones de CO2 debido al origen renovable del contenido de caucho natural y el ahorro del sistema de secado previo a la entrada al horno gracias a su bajo contenido en humedad. [8]

3.2 Solución alternativa de revestimiento en la construcción con material de caucho de NFU y serrín de eucaliptus [9]

Esta investigación se ha basado en "La comparación experimental entre los resultados obtenidos del nuevo material evaluado y dos materiales del mercado de similares características, uno mezcla de madera y plástico y otro de fibras de madera" [9].

Se han estudiado las propiedades físicas y mecánicas de un material compuesto a partir de caucho reciclado proveniente de los Neumáticos Fuera de Uso y aserrín de Eucalyptus Regnans, con la intención de ser usado como revestimiento en la construcción.

Para esto, según la metodología la intención fue encontrar una proporción idónea según la normativa aplicable al lugar de procedencia, realizando diversos ensayos con la intención de ser un sistema de revestimiento un 15% más eficaz que los sistemas con los que se comparó.

BIBL [8] Información obtenida de la página oficial de la empresa

<https://www.signus.es/aplicaciones-neumaticos-reciclados/>

BIBL [9] Tesis _ Universidad del bío-bío facultad de arquitectura, construcción y diseño departamento de ciencias de la construcción escuela de ingeniería en construcción

Debido a la falta de información previa referente a sistemas similares optó por seguir un sistema conocido en tipo paneles, sin embargo se encontró con problemas debido a las altas temperaturas necesarias para la fusión de estos elementos, lo que desvió por una producción de probetas prensadas en frío. Esto influyó notablemente en los resultados finales, los cuales en sus propiedades, encontraron una buena resistencia a rotura y buen módulo de elasticidad, aunque no superaban a los sistemas con los que se comparó.

Entre sus propiedades más significativas cabe mencionar un elevado porcentaje de absorción e hinchamiento atribuido al método de elaboración de las probetas.

Como línea de investigación propone un estudio en sus propiedades térmicas.

3.3 Paneles Aislantes de sonido elaborados con Hormigón y adición de polvo de NFU [10]

Esta investigación se ha basado en “Comparación experimental entre los resultados obtenidos nuevo panel y la normativa existente referente a paneles de hormigón”. [10]

La base de su estudio fue estudiar propiedades del polvo de Neumático como elemento que aporta en propiedades acústicas y mecánicas, utilizando un elemento reciclado que mejore las propiedades del elemento constructivo.

Analizando las propiedades físicas y mecánicas como agregado fino contemplando la normativa aplicable a su lugar de estudio.

Buscando desde un principio mediante el estudio de la dosificación no afectar en la funcionalidad de los paneles, enfocado siempre como sistema aislante de ruido.

El polvo de neumático puede adicionarse a una mezcla de hormigón para la elaboración de paneles aislantes de sonido con funciones de muro divisorio, dadas las reducciones en las resistencias a compresión y flexión referidas al diseño del ensayo, sin alterar su composición química. Las características físicas y propiedades mecánicas del polvo de neumático obtenidas del análisis de laboratorio no lo catalogan como un material pétreo normado, por lo que únicamente puede usarse como una adición al volumen de una mezcla y no como un sustituto de agregado fino.

El polvo de neumático no cumple con los límites de granulometría de la norma, se le clasifica como un material muy grueso y con densidades muy bajas por su naturaleza, reduciendo el peso unitario del concreto.

BIBL [10] Tesis _ PANELES AISLANTES DE SONIDO ELABORADOS CON CONCRETO Y ADICIÓN DE POLVO DE LLANTA por Guillermo Antonio Guzmán Arriola

Se definió un 5% de adición de caucho respecto a la suma de los agregados gruesos y finos para la mezcla utilizada en la elaboración de los paneles, al presentar una resistencia apta para funcionar como muros divisorios y una reducción en peso considerable para la manipulación de los mismos.

Los sistemas utilizados para la medición de absorción de sonido presentaron la rigidez necesaria para su manipulación, colocación y acondicionamiento durante las pruebas de sonido.

El cajón con la adición de caucho presentó una reducción de ruido en un orden de hasta 5 dB respecto al patrón, para las condiciones de ensayo a las que fueron sometidos. Este resultado es satisfactorio para el estudio.

3.4 Tierra Proyectada

La patente y marca de tierra proyectada pone en valor el uso de la tierra como material de construcción al aplicarse con un sistema de puesta en obra con extraordinarios resultados en otros materiales de construcción: la proyección. [23]



Fig.7. Fotografía obtenida de la Tesis de Tierra Proyectada

Las ventajas del material proyectado ya puesto en obra son, como más significativas, la mayor adherencia al soporte, mayor densidad del material proyectado y mayores resistencias mecánicas. Al trasladar la proyección a la tierra la dotamos de estas ventajas, que añadidas a las propiedades que en si tiene este material, hace que la tierra pueda competir con morteros de restauración y/o de revestimiento. Es una técnica además que está en auge además por cumplir todos los requisitos fundamentales de la sostenibilidad.

La masa de tierra aportada (con un 10% de NHL) mediante proyección no es estándar sino que utiliza la misma procedente de la excavación de la cimentación del edificio, en su caso, o de los alrededores de la obra, resultando el material aportado de una textura y color similar a la del entorno.

4 METODOLOGÍA

4.1 De campo

Teniendo en cuenta la intención principal de esta investigación de ser comparada con la información obtenida por la Tesis doctoral de Tierra Proyectada, la tierra base, se obtuvo de la extracción de suelo de formación Alhambra, para poder asemejarse a las características obtenidas de la tesis. Se extrajeron muestras de terreno similares a las extraídas en la investigación [11] "Características de la compactación de suelos edáficos de la formación Alhambra utilizando un estabilizador de enzimas ecológicas en sustitución de cal" investigación publicada por Víctor Ortega Ruiz como Trabajo Fin de Grado de la Escuela Superior de Arquitectura de Granada, el cual ubica el punto extracción "de camino al Fargue desde el barrio del Albaicín, una pequeña localidad cercana a la ciudad de Granada, en el camino viejo existen terrenos y huertas de vertidos antrópicos o suelos coluviales del conglomerado Alhambra que son de fácil acceso". Ya que estos se usaron con anterioridad fue fácil su extracción, uso y catalogación.

4.1.1 Toma de muestras de tierra en yacimiento (Formación Alhambra/coluvial de la Formación Alhambra)

La Tierra extraída anteriormente citada es la base de la composición de las mezclas, como ya se ha dicho, era de gran importancia encontrar material del que partir que compartiera características con la Tierra Madre de investigaciones de Tierra Proyectada, para adecuar su uso y comparación.

Previo a su uso en ensayos y proyección, se hizo un tratamiento de limpieza con el fin de quitar vegetación superficial, y materia orgánica.



Fig. 8. Almacenamiento sacos de 20kg

Almacenados en sacos de 20kg y transportados al laboratorio para su posterior tratamiento, primero con eliminación de terrones y luego con tamizado mecánico de <10mm.



Fig. 9. Tamizado mecánico

[11] Caracterización de la compactación de suelos edáficos de la formación alhambra utilizando un estabilizador de enzimas ecológicas en sustitución de cal" investigación publicada por Víctor Ortega Ruiz como Trabajo Fin de Grado de la Escuela Superior de Arquitectura de Granada

4.1.2 Recepción e identificación del caucho suministrado por la empresa SIGNUS

Por parte de la empresa SIGNUS, se recibieron en total 4 sacos de materia a ensayar, entre los cuales se encontraba en mayor medida (3 sacos) polvo de caucho comprendido entre 0-08mm y 1 saco de mezcla de material textil y polvo de caucho, comprendido entre 0-10mm, ambos estudiados en paralelo para

encontrar la mezcla óptima y el elemento

que aportara en mayor medida condiciones idóneas a la composición buscada. De estos estudios se ha obtenido, que para proyectar sería más idóneo la mezcla entre fibra textil y polvo de caucho, ya que por sus características de fibra, se ha previsto de dotar una mayor resistencia a tracción, además de esto con las características de residuo plástico, aporta un grado mayor de impermeabilidad a la mezcla, la cual se irá desarrollando a lo largo de esta investigación.



Fig. 10. Sacos de residuo aportado por SIGNUS

4.2 De Laboratorio

4.2.1 Ensayos de identificación

Con las intención de hacer una clasificación rigurosa de los estados de la materia a ensayar enfocados en todo momento en el material base (Tierra) y residuo a añadir (Fibra de caucho + Polvo de caucho) se han hecho ensayos Físicos-Químicos-Mecánicos y de alteración con la finalidad de encontrar las características de idoneidad y propias de los materiales. Todos estos ensayos han sido sometidos rigurosamente a la normativa aplicable en cada caso en ambientes controlados, siendo este en todo momento el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, situada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Granada.



Fig. 11. Muestras y probetas en estufa. Secado a 110°C

4.2.1.1 Físicos:

Textura y Plasticidad [12]

Distribución granulométrica. (UNE 103 101 : 1995)

Para conocer la textura que tiene un suelo se realizan análisis granulométricos utilizando la vía seca para partículas de tamaños superiores a 0,075 mm (N° 200 ASTM, equivalente al 0,080 UNE). En la normativa española el análisis granulométrico de suelos se recoge en la UNE 103-101, donde se establece el método para determinar los diferentes tamaños de las partículas de un suelo y obtener la cantidad, expresada en tanto por ciento de éstas, que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el 0.080mm.

Tras secar la muestra al aire o en estufa a una temperatura inferior a 60°C se disgrega con mazo de goma y mediante cuarteo se obtiene la cantidad necesaria pesándola con una precisión de 1g. A esta muestra se le hace pasar por un conjunto de tamices previamente establecidos diferenciando tres fracciones, serie de tamices superiores a 20mm, serie entre 20-2.5mm y la comprendida entre 2.5-0.08mm (generalmente los tamaños suelen ir disminuyendo en progresión geométrica de razón 2).



Fig. 12. Tamizadora mecánica

Tras agitar el conjunto de tamices, se pesa lo retenido en cada uno de ellos, con lo que conocido el peso inicial de la muestra, se determina el porcentaje de material que pasa por un tamiz de abertura D. No obstante, en esta norma se establece la necesidad de lavar en determinados casos el material retenido en el tamiz 20mm para que se separe el material fino adherido a éste y se agrega a la fracción que pasa por el tamiz 20UNE. De igual forma se procede con la fracción retenida en el tamiz 2mm. En la fracción inferior a 2mm se determina la humedad higroscópica y se toma una porción de muestra que se somete a dispersión mediante una solución de hexametáfosfatosódico; posteriormente, se pasa por el tamiz 0.08 hasta lavar la totalidad de los finos.

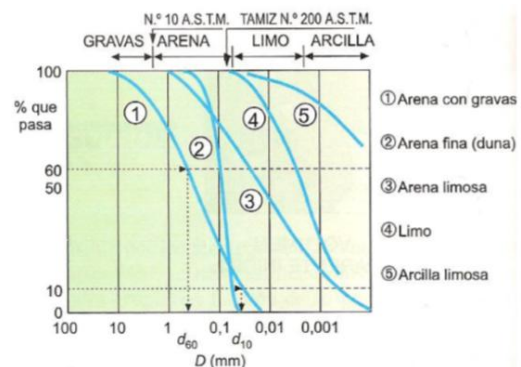


Fig. 13. Granulometría de partículas

[12] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.4.- Descripción y clasificación de suelos, la cual previene de UNE 103-101, y ha sido estudiada en paralelo

Para la mejor definición de la granulometría se utilizan dos coeficientes (González de Vallejo et al, Ingeniería Geológica, 2005):

El de uniformidad C_u , que es la relación entre la abertura correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% del material y la abertura correspondiente al tamiz por el que pasa el 10%.

Si C_u es menor de 5 el suelo tiene una granulometría uniforme; si varía entre 5-20 es poco uniforme y si es mayor de 20 es un suelo bien graduado. Cuanto más uniforme es la granulometría de un suelo, más uniforme es el tamaño de sus huecos, menores densidades alcanzarán y más fácilmente será erosionado.

El contenido en finos llamando así al porcentaje de suelo que pasa por el tamiz N°200 ASTM (0.08UNE). Este porcentaje indica la proporción de arcilla y limo que contiene el suelo y está relacionado con la posibilidad de retención de agua. Cuanto mayor sea el contenido de finos mayor será la dificultad de expulsión de agua y la problemática derivada de retracciones.

Este procedimiento es el que hemos seguido para la caracterización de suelos extraídos de cantera (Formación Alhambra) o de la masa de los propios tapiales con vistas a establecer su textura y su clasificación USCS posterior utilizando conjuntamente los Límites de Atterberg.

Sin embargo, habida cuenta que el fin de este trabajo era preparar la tierra para ser proyectada al igual que la gunita o el hormigón utilizando la misma maquinaria, se entendió que era de importancia considerar a la tierra como un árido y por tanto establecer su textura a través de curvas granulométricas obtenidas en base a la normativa de ensayo establecida en la EHE (UNE EN 933-2:96), lo que permitiría establecer comparaciones, desviaciones y las consecuencias de éstas, con los husos granulométricos adecuados a las distintas fracciones para hormigones y morteros proyectados.

En este caso, el grado de uniformidad se ha establecido según los parámetros anteriores y por comparación con curvas de Fuller y a través de módulos granulométricos.



Fig. 14. Grupo de tamices utilizados

Plasticidad. UNE 103-103-94

Los estados de consistencia de un suelo disgregado dependen del grado de humedad. A tal efecto se han establecido convencionalmente los siguientes grados: consistencia líquida, plástica, semisólida y sólida. El paso de una a otra se da a través de un estado límite de humedad que se expresan como límite líquido (LL, humedad de paso de consistencia líquida a plástica o



Fig. 15. Instrumentos utilizados para obtención LP Y LL

viceversa), límite plástico (LP, humedad de paso de consistencia plástica a semisólida o viceversa) y límite de retracción (LR, humedad de paso de consistencia semisólida a sólida o viceversa). A los dos primeros, es decir, LL y LP, se les denomina a su vez Límites de Atterberg y a la diferencia entre ambos, $LL - LP$, Índice de Plasticidad (IP).

En lo que respecta al límite de retracción, establece el grado de humedad a partir del cual, aunque éste disminuya, el volumen del suelo permanece constante".

Para la obtención del **Límite líquido**, se ha tomado como referencia en todo momento la normativa de aplicación UNE 103-103-1994, en la cual se sigue el siguiente procedimiento, se toma una muestra del suelo limpio que pase por el tamiz 0.40mm hasta obtener aproximadamente 250gr de materia tamizada, a continuación se agrega agua destilada y se mezcla hasta obtener una masa homogénea.

Posteriormente se calibra la cuchara de casa grande, cumpliendo las indicaciones de la Norma, se procede a poner una parte de la mezcla enrasándola con una espátula para dejar en su parte más profunda una profundidad de 10mm. Se hace un surco en su mitad con un acanalador normalizado. Y se procede al golpeo con el aparato, desde una altura de 1cm (anteriormente calibrado) a un ritmo de 2 golpes por segundo hasta lograr un cierre en la parte intermedia del surco con una distancia en torno a 13mm, anotando el grupo de golpes necesarios para lograr éste.

Se toma una muestra del bloque central la cual, previamente, se pesa la tara, se deposita la muestra, y se pone a secar a una temperatura de 115°C , la cual estará en el horno hasta peso constante. Posteriormente se saca y se pesa.

La definición de la norma define el Límite líquido viene determinada por aquella humedad en la que el surco necesita 25 golpes para cerrarse 13mm en la zona interior. Ya que es difícil conseguir exactamente esta exigencia, la norma admite conseguir una muestra entre 15-15 golpes y otra entre 15-25 golpes, se representan en una tabla y una gráfica para determinar todos los valores necesarios.

El **Límite Plástico** determinado por la normativa UNE 103-104-1993.

Se define el límite plástico de un suelo, a los efectos de esta norma, como la humedad más baja con la que pueden formarse con un suelo, cilindros de 3mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros



Fig. 16. Aparato de Casagrande



Fig. 17. Cilindro de ensayo Tierra

empiecen a resquebrajarse.

Se obtiene una porción de suelo de 20g que pase por el tamiz 400µm Norma UNE 7050-2, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE 103-103. Se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola. Se toman 15g de dicha bola como muestra para el ensayo.

Se moldea la mitad de la muestra en forma de elipsoide y, a continuación se hace rodar entre los dedos de la mano y la superficie lisa con la presión estrictamente necesaria para que se formen cilindros.

Si al llegar el cilindro a un diámetro de 3 mm no se ha resquebrajado, se parte en seis u ocho trozos, amasándolos juntos, con los dedos de ambas manos hasta que se consiga una masa uniforme moldeada en forma aproximadamente de elipsoide. Se repite el proceso del párrafo anterior cuantas veces sea necesario, hasta que el cilindro se resquebraje. Si esto sucede siendo el diámetro del cilindro mayor de 3 mm se dará por terminado el proceso, siempre y cuando haya sido posible previamente, durante el mismo, formar cilindros de 3mm de diámetro.

Alcanzado el grado de humedad que produce el resquebrajamiento del cilindro, ésta se determina, según Norma UNE103-300, dando como resultado el valor de límite plástico. A fin de tener, al menos dos valores, se repite con la otra mitad de la muestra el método operatorio completo. Se pesa la muestra y posteriormente se seca a una Tª de 60°C hasta obtener un peso constate.

Humedad Higroscópica [13]

El suelo es un material que contiene en sus poros aire y agua. Se debe conocer el contenido de humedad higroscópica del suelo, humedad natural que debido a su ambiente es capaz de retener. Esta humedad es característica de su estructura fisicoquímica, es decir de las relaciones de polaridad de la estructura del suelo con relación a la estructura de la molécula de agua.

Para su determinación se pesa el suelo secado al aire (M1) y posteriormente se introduce en estufa manteniendo una temperatura entre 105°C y 115°C, hasta masa constante, pesando tras esta operación la masa del suelo seco (M2).

Con los datos registrados anteriormente, se calcula el contenido porcentual de humedad higroscópica de acuerdo con la siguiente expresión:

$$H(\%)= 100(M1-M2)/M2''$$



Fig. 18. Muestra secada en estufa hasta peso constante

[13] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.3.- Determinación de la humedad higroscópica

Ensayos de compactación. Proctor normal UNE103-500-94 [14]

Con este ensayo se determina la relación entre la densidad seca y la humedad, para una energía de compactación de 0,583 J/cm³, y definir la densidad seca máxima y su humedad óptima correspondiente. El método se basa en la determinación de las densidades secas de varias probetas, compactadas en idénticas condiciones pero con contenidos de humedades diferentes. Para cada contenido de humedad se alcanza una determinada densidad, de manera que estos pares de valores, representados en coordenadas cartesianas, definen la relación buscada. Se define «humedad óptima» del suelo aquella con la que se consigue la máxima densidad seca, para la energía de compactación indicada. Se define como «densidad seca máxima Proctor Normal» del suelo la que se obtiene para la «humedad óptima», con la energía de compactación especificada anteriormente.



Fig. 19. Ensayo Proctor normal.
Determinación
Humedad óptima y densidad
máxima

El molde utilizado es cilíndrico de metal de 102 mm \pm 0,4 mm de diámetro interior y 122,4 mm \pm 0,1 mm de altura, lo que equivale aproximadamente a un volumen de 1.000 cm³. Debe disponer de un collar del mismo diámetro y altura aproximada de 60mm, para colocarlo en la parte superior del molde durante las operaciones de apisonado.



Fig. 20. Molde usado ensayo proctor

El molde y el collar deben estar contruidos de forma que puedan sujetarse firmemente a la base plana metálica desmontable. La maza debe ser metálica de 2,5 kg \pm 0,01 kg, adaptada al interior de una guía tubular, adecuada para que la altura de caída libre sea de 305 mm \pm 2 mm. La maza puede ser manual o automática.

Si el suelo recibido está excesivamente húmedo, se extiende y se deja secar al aire o bien se procede a su secado en estufa o por aire caliente u otro procedimiento, tomando la precaución de que la temperatura del suelo no exceda de 60°C. Una vez conseguido esto, se procede a desmenuzarlo, deshaciendo los terrones por medio del mazo de goma. Del suelo seco y desmenuzado, se separa mediante los cuarteadores adecuados la cantidad necesaria para disponer una muestra de unos 15 kg de material que pase por el tamiz 20mm Norma UNE 7-050/2. Se determina en balanza la masa de la muestra tomada y la del material retenido en dicho tamiz y se calcula el tanto por ciento que representa éste, respecto a la muestra.

[14] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010). Apartado 4.3.11.- Ensayo de compactación. Proctor normal. UNE 103-500-94

El material que pasa por dicho tamiz se cuartea en porciones homogéneas, aproximadamente iguales, de unos 2,5kg. Se determina el volumen V del molde en cm^3 . Esta operación se debe comprobar periódicamente. Se determina la masa del molde con su base y sin el collar superior. Se toma una de las fracciones de suelo y se mezcla con una cantidad de agua hasta que quede íntima y uniformemente distribuida. Esta operación se ha realizado a mano, utilizando los guantes de goma. Se llena el molde con el collar colocado, mediante la porción desuelo mezclada con agua, repartida en tres capas aproximadamente iguales, de forma que cada capa, después de compactada, quede con una altura ligeramente superior a un tercio de la altura del molde. La compactación de cada una de estas capas se realiza por medio de 26 golpes de la maza, distribuidos uniformemente. La última capa compactada debe entrar aproximadamente 1 cm en el collar superior. Terminada la compactación se retira el collar y se enrasa cuidadosamente el suelo con el borde del molde. Se determina la masa del conjunto formado por el molde y el suelo compactado. Se extrae el suelo del molde, abriendo éste si es bipartido o por medio del extractor si fuese de una pieza; se parte verticalmente por el centro y se toma una cantidad representativa, de masa no inferior a 100g, para determinar la humedad según la Norma UNE 103-300. Se repite la operación con nuevas porciones de suelo, pero añadiendo cantidades de agua distintas en cada proceso de amasado, hasta obtener los puntos necesarios para determinar la curva que relaciona la densidad seca con la humedad. En tales casos, para mantener la energía por unidad de volumen especificada, se compacta el suelo en tres capas, aplicando a cada una de ellas 60 golpes con la maza de 2,5kg y una altura de caída de 305mm. Generalmente, tres puntos de la rama ascendente y otros dos en la descendente son suficientes para definir la curva. Sin embargo para este ensayo se han obtenido dos puntos de subida y dos de bajada. Suele ser recomendable comenzar por la determinación correspondiente a la humedad menor y continuar aumentando ésta con intervalos comprendidos entre el 1% y el 3% de humedad, según se trate de suelos arenosos o arcillosos. En un gráfico que tenga por abscisas los tantos por ciento de humedad y por ordenadas las densidades secas, se sitúan los puntos definidos por los valores calculados. Con estos puntos se dibuja una curva suave. Las coordenadas del máximo de esta curva definen la «densidad máxima» y la «humedad óptima» del ensayo".



Fig 21. Probeta compactación proctor

4.2.1.2 Químicos

Pruebas de carbonatación con fenolftaleína [15]

La fenolftaleína es un indicador químico ($C_{20}H_{14}O_4$) que en nuestro caso cambia de color morado o rosa intenso a incoloro al pasar de Ph alcalino a neutro, apareciendo el primero con pH en torno a 14, debido a la existencia de la portlandita procedente de la cal hidratada añadida, y el segundo cuando ésta se transforma en calcita tras sufrir la anterior carbonatación. Este proceso se manifiesta de exterior a interior de las muestras creciendo el espesor de zona no coloreada conforme penetra el CO_2 .

Esta técnica, se considera fiable según K. Kouzell, si en la muestra existe más de un 10% de portlandita, y consiste en la aplicación (pulverizada) de una solución de fenolftaleína al 0,2% en etanol".



Fig. 22. Probeta con ensayo de fenolftaleína



Fig. 23. Prueba con Fenolftaleína

Ensayo en cámara de carbonatación acelerada [16]

Se ha llevado a cabo en una cámara climática manteniendo constante la temperatura, a $20^{\circ}C$ (al aumentar la temperatura decrece la solubilidad del $Ca(OH)_2$; el valor óptimo sería de $20^{\circ}C$, según Fernández Carrascoetal, 1999), y la humedad relativa al 50% (porcentaje con el que se obtiene la máxima velocidad de carbonatación; cuando la humedad es muy baja se forma carbonato cálcico amorfo, y si es media-alta se forma aragonito (KorneevyTsvang,1986).

En esta cámara, mediante bombonas de CO_2 , se introdujo éste, controlando el flujo a través de un manómetro, en un intervalo corto de tiempo hasta alcanzar la saturación, comprobando la situación a través de una espita situada en la parte más distante de la entrada del gas. El proceso puede durar desde días, normalmente utilizando cámara de carbonatación acelerada, hasta meses e incluso siglos.



Fig. 24. Cámara de carbonatación acelerada

[15] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010). Apartado 4.3.19.- Pruebas con fenolftaleína

[16] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.23.-Ensayo en cámara de carbonatación acelerada

El tiempo necesario para que el anhídrido carbónico de la atmósfera penetre en el interior de la muestra endureciendo desde el interior hasta el exterior de la misma, es muy prolongado. El proceso se ralentiza en lugares poco aireados por falta de CO_2 y en aquellos en los que exista bajo grado de humedad.

4.2.1.3 Mecánicos:

Ensayo de rotura a compresión simple en probetas [17]

Tras los resultados de las primeras roturas en probetas (la mayoría fabricadas en el molde de Proctor Normal, otras en el Proctor Modificado y algunas talladas con forma cúbica) con distintas mezclas y dosificaciones, se decidió utilizar dos tipos de prensas, a fin de obtener la máxima precisión en el valor de rotura. Una de ellas, para las probetas que previsiblemente alcanzarían resistencias inferiores a 4MPa (prensa electromecánica con anillo dinamométrico y capacidad máxima de 5Tn), y otra, para mayores resistencias (cuyo dispositivo mecánico acciona un sistema hidráulico que permite crear esfuerzos de compresión y tracción con medición de carga mediante manómetro).

En esta última, las lecturas se transmiten a un sistema informático que permite medir la carga transmitida en Tn hasta un máximo de 30Tn, así como las deformaciones de las probetas ensayadas.

En ambos casos se ha trabajado con Velocidades de transmisión de carga normalizadas (UNE1034 ensayo se da por terminado cuando se logra la rotura de la probeta.

Antes de proceder al ensayo se pesaron las probetas secas en estufa y se midió su altura, así como el diámetro de la misma, en probetas de suelo aunque fueran probetas estándar en el caso de aquellas resultantes del ensayo Proctor, con lo cual pudo obtenerse la humedad y densidad de cada una. Una vez finalizado el ensayo se realizó un esquema de la forma de rotura, además de documentarlas gráficamente.

Las tensiones se obtuvieron dividiendo la carga por el área de la sección inicial de la probeta ensayada.



Fig. 25. Probeta rota a compresión sólo Tierra



Fig. 26. Prensa utilizada para ensayos sistema hidráulico



Fig. 27. Prensa utilizada para ensayos sistema electromecánica

[17] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010). Apartado 4.3.24.-Ensayo de rotura a compresión simple

4.2.2 Proyecciones

Ya que la maquinaria empleada en la proyección era diferente a la utilizada en las primeras investigaciones sobre tierra proyectada, se hicieron varias pruebas con proporciones diferentes, para encontrar la mezcla óptima. Ya que la puesta en obra necesita de una consistencia determinada, que generalmente no se consigue partiendo de la humedad óptima del proctor. Las diferentes pruebas previamente establecieron las siguientes mezclas:

Mezcla sólo tierra.

1. **6kg NHL-5**
2. **600 gr BL 1 52.5**
3. **19 L Agua**
4. **7 Kg Árido dolomítico**
5. **15 Kg Tierra**
6. **15 Kg Tierra**
7. **7 Kg Árido dolomítico**
8. **15 Kg Tierra**
9. **15 Kg Tierra**
10. **1 L Agua**



Fig. 28. Panel Proyectado sólo Tierra

Con esta mezcla se proyectó uno de los soportes, y se llenaron probetas con el fin de evaluar su comportamiento físico, mecánico y químico. Siguiendo las proporciones idóneas de proyección se hizo una aproximación a nuestra investigación, teniendo en cuenta el añadido de un material nuevo y su posible comportamiento.

Antes de proyectar se hizo todo el estudio necesario sobre la mezcla óptima, teniendo en cuenta que la resistencia no es prioritaria, sino las propiedades que pueda aportar el caucho o los residuos de la mezcla a la tierra, se adaptaron las siguientes opciones:

- Tierra + 10% Caucho
- Tierra + 20% Caucho
- Tierra + 30% Caucho

Ya que se obtuvieron menores resistencias conforme se aumentaba el porcentaje de residuo se optó por la mezcla intermedia. Utilizando entonces "TIERRA + 20% CAUCHO". Todo esto teniendo en cuenta que ya que la maquinaria utilizada era diferente no podría compararse directamente con otros resultados de diferentes publicaciones, el objetivo principal era conseguir la mejor consistencia para su aplicación.

La proyección se desarrolló en 3 tandas.

Una primera capa con el siguiente amasado:

1. **6kg NHL-5 (10% Tierra)**
2. **600 gr BL 1 52.5 (1% Tierra)**
3. **12 L Agua (0.3 a/T)**
4. **7 Kg Árido dolomítico (23% Tierra)**
5. **30 Kg Tierra**
6. **6 Kg Residuo Caucho+Textil (20% Tierra)**
7. **1 L Agua**
8. **30 Kg Tierra**
9. **7 Kg Árido dolomítico**
10. **6 Kg Residuo Caucho+Textil**
11. **8 L Agua**

Para un total de:

- 60 Kg Tierra
- 21 L Agua
- 14 Kg Árido dolomítico
- 12 Kg Residuo Caucho+Textil
- 6 Kg NHL-5
- 600 Gr BL 1 52.5

De esta primera proyección se pudo observar una gran retención de líquido por parte de la fibra aportada, ejemplo claro ya que en otros casos donde se usaba un añadido diferente con las mismas cantidades de agua la variación en textura afectaba notablemente a la consistencia.

Una vez hecha la mezcla se aprecia que estaba muy seca, sin embargo pudo proyectarse, no obstante en la 2da proyección se cambió el orden de amasado, comenzando por la saturación del caucho con fibra, para intentar aportar una textura diferente a la mezcla.

Una segunda capa con el siguiente amasado:

1. **6 Kg NHL-5 (1% Tierra)**
2. **600 Gr BL 1 52.5 (10% Tierra)**
3. **18 L Agua (0.3 a/T)**
4. **12 Kg Caucho (20% Tierra)**
5. **7 Kg Árido dolomítico (23% Tierra)**
6. **20 Kg Tierra**
7. **20 Kg Tierra**
8. **20 Kg Tierra**
9. **7 Kg Árido**
10. **1 L Agua**
11. **1L Agua**
12. **1L Agua**



Fig. 29. 1ra Mezcla obtenida



Fig. 30. Primera proyección



Fig. 31. 2da Mezcla obtenida

Para un total de:

60 Kg Tierra

21 L Agua

14 Kg Árido dolomítico

12 Kg Residuo Caucho+Textil

6 Kg NHL-5

600 Gr BL 1 52.5



Fig. 32. Segunda proyección

De la segunda proyección se obtuvo la conclusión que el orden de amasado influye, ya que al humedecer la fibra primero, reparte mejor el agua una vez amasado con los demás los componentes, quedando ésta en un final con la misma cantidad de agua pero con una consistencia más fluida. Sin embargo la proporción de rechazo era mucho mayor que la proyección con sólo tierra. Por esta razón se añadió más agua con la finalidad de mejorar la proyección y su rechazo fuera menor, sin embargo debido a la mayor cantidad de agua el peso de la masa era mayor llegando a desprenderse del soporte, se optó por tanto realizar la proyección en dos capas.

Una tercera capa con el siguiente amasado:

1. **9 L Agua**
2. **12 Kg Caucho**
3. **9 L Agua**
4. **600 Gr BL 1 52.5**
5. **6 Kg NHL-5**
6. **15 Kg Tierra**
7. **7 Kg Árido dolomítico**
8. **15 Kg Tierra**
9. **250 ml Fluidificante**
10. **7 Kg Árido 1 L Agua**
11. **15 Kg Tierra**
12. **2L Agua**



Fig. 33. 3ra Mezcla obtenida

Para un total de:

45 Kg Tierra

20 L Agua

14 Kg Árido dolomítico

12 Kg Residuo Caucho+Textil

6 Kg NHL-5

600 Gr BL 1 52.5

250 ml Fluidificante 3425 Sika



Fig. 34. Tercera proyección

En esta proyección se pudo observar un "raro" comportamiento del caucho, ya que para continuar con la idea de la segunda proyección se puso en remojo con el total de



Fig. 35. Fibra textil con toda el agua en tambor de mezcla

la proporción del caucho, ésta parecía que absorbía completamente el agua, quedando superficialmente mojada Fig 37, y al añadir los aglomerantes soltaba completamente el agua retenida. De donde Se llegó a la conclusión que este fenómeno debería tratarse en una línea de continuación de la investigación.

4.2.2.1 Tipo de soporte



Fig. 36 Tabique de ladrillo para proyección



Fig. 37. Tabique de bloques de hormigón utilizado para prueba de máquina

Para la proyección de las muestras se elaboraron dos tabiques en los dos materiales anteriormente citados, el de bloques de hormigón utilizado para el ensayos previos, y un segundo para estudiar el resultado de las diferentes mezclas.

4.2.2.2 Tipo de maquinaria para la aplicación de las mezclas en el soporte.

La maquinaria utilizada fue la “Revocadora Tigre. Modelo P4 para pared”. Hace más de 50 años que las revocadoras TIGRE™ se utilizan en todo el mundo para la proyección de concreto sobre todo tipo de sistemas constructivos. La utilización de las revocadoras, no solo genera ahorros importantes en tiempo de obra y desperdicio de material sino que además no necesita mano de obra especializada. La Revocadora TIGRE™ conectada al compresor y cargada de mezcla en su balde, logra aplicar el revoque una velocidad y adherencia imposible de alcanzar con el revoque manual. Las revocadoras TIGRE™ permiten además, la proyección del revoque simulando la piedra o el ladrillo de manera más económica, sin desperdicio de piedra, acarreo de las mismas, ni necesidad de habilidades para su colocación.



MODELOS REVOCADORAS	
Modelo P4 (Para Pared)	Tipo de trabajo
4 agujeros	Para revoque de espesor, superficies amplias, etc.

Fig. 38. Imagen obtenida de la página oficial de referencia



Fig. 39. Maquinaria utilizada en la proyección en el laboratorio

APLICACIÓN EN PAREDES: Para optimizar el potencial de las revocadoras tigre™, recomendamos aplicar el revoque con un movimiento ascendente y parejo. [18]

4.2.2.3 Extracción de muestras de los revestimientos aplicados al soporte y preparación las probetas para ensayos.

Una vez realizada la proyección, como se indica en el punto 4.2.2 Proyecciones, de esta investigación, se han dejado secar en condiciones ambientales, expuesto a la intemperie del sol, finalizando primavera, durante una semana tras la última proyección (Fig.43).

Pasada una semana fueron extraídas 3 trozos tanto de la proyección sólo tierra como de la proyección Tierra + Residuo (Fig. 44)

Resistencia a compresión.

Con la finalidad de poder evaluar las muestras obtenidas han sido talladas buscando lo más cercano a un cubo de medidas conocidas para aplicar ensayos a compresión simple a cada una de las probetas (Fig. 42).

Además se han ensayado las probetas obtenidas con medidas conocidas (Fig. 43) de las diferentes capas, una vez amasada la mezcla, antes de proyectar, con la finalidad de poder compararlas entre ellas.

Se han realizado y ensayado probetas con dimensiones 10x10x10, 5x5x5 y a Flexión simple de 40x10x10, tanto de tierra como con adición de residuo.



Fig. 40. Soportes con proyecciones. izq sólo Tierra. Drcha Tierra + Residuo



Fig. 41. Muestras extraídas de la proyección



Fig. 42. Probetas obtenidas de las muestras extraídas Fig 41



Fig. 43. Probetas obtenidas de las mezclas proyectadas



Fig. 44. Probetas ensayadas a compresión

[18] Información obtenida de la página oficial de compra de la Revocadora Tigre.
<http://www.revocadorastigre.com/index.html>

Adherencia.

Siguiendo la línea tratada en la línea de trabajo en Tierra proyectada, se decidió realizar ensayos de adherencia «in situ» en los paneles utilizando el aparataje y procedimiento para medir ésta propiedad en las uniones entre morteros y de éstos con aplacados, además de otras aplicaciones. Para tal fin se ha utilizado un probador de adherencia digital AT-1 de la marca NEURTEK (Fig 47), que está diseñado para medir mediante lectura digital la fuerza de adherencia de todo tipo de revestimientos, pudiéndose entender a la masa proyectada como un revestimiento más. Cumple con las normas NFP 34501/301 y NFP 34601/602 (sufrideras de 50mm).

El instrumento utiliza el método de tracción y mide en Kg/cm² la resistencia al arrancamiento requerida para extraer, a través de una sufridera, la masa aislada durante el proceso de proyección mediante un tubo de PVC cilíndrico (Fig. 45) con diámetro interior de 5cm. Una vez preparada la superficie, se alisa la cara superior a la que se le pega la sufridera para posteriormente proceder (Fig. 46) a su extracción por tracción.



Fig. 45. Masa aislada durante el proceso de proyección



Fig. 46. Masa aislada durante el proceso de proyección



Fig. 47. Adherómetro digital

5 MEZCLAS DE TIERRA CON CAUCHO

5.1 Mezcla de tierra con caucho

Como ya se explicará posteriormente, para la selección de las mezclas óptimas, se hizo un total de 5 ensayos Proctor Normal con la intención de buscar las proporciones más acertadas. Desde un punto de vista granulométrico, ya que en el momento de puesta en obra sería importante la compatibilidad y mayor aprovechamiento de ambos en conjunto desde un punto de vista de composición y facilidad en su proyección. Una característica de esta mezcla es el cambio de color que el caucho aporta a la tierra, característica positiva o negativa según se prevea su uso posterior.



Fig.48. Imagen de laboratorio Tierra + Caucho

5.1.1 Materiales Utilizados

5.1.1.1 Suelos edáficos de la Formación Alhambra

Las muestras sometidas a ensayo proceden de la toma que se realizaron del acopio que se disponían en el laboratorio, como ya se explica en el punto 4.1.1 de esta investigación su procedencia y forma de extracción. A ellas se le han realizado determinaciones físicas, químicas, y mecánicas. Tanto de elaboración en laboratorio por compactación proctor, como de las tandas utilizadas para la proyección.



Fig. 49. Acopio de Tierra en el laboratorio

5.1.1.2 Caucho procedente de residuos de neumáticos

Como ya se explica en el punto 3.1 de esta investigación en la definición del polvo de caucho, este proviene de la trituración mecánica de los NCFU que se hace mediante un sistema de maquinaria especializada. Este se encarga de separar todos los componentes de los Neumáticos, dejando los textiles, el acero y el caucho agrupados de forma independiente, de modo que resulta un "Polvo y granulado de caucho" 99% libre de impurezas.



Fig. 50. Muestra de Polvo de caucho obtenida después de ensayar granulométricamente

Se caracteriza por ser un material que se presenta en forma de gránulos (4mm aprox) o polvo (partículas más pequeñas), y dependiendo de su granulometría la aplicación posterior que tendrá. El tamaño de las partículas puede ser elegido en la maquinaria de modo que esta produzca el adecuado para el uso designado. [5]

5.1.1.3 Aglomerantes

Los Materiales Aglomerantes utilizados son los denominados:

Cal hidráulica.

Es una cal en polvo y parcialmente apagada que puede fraguar en sitios húmedos y debajo del agua. De baja resistencia mecánica, su valor depende de la proporción de arcilla que contengan. Por encima del 21,8% se obtiene ya un Cemento de fraguado lento. [19]

En una primera toma contacto se escogió el uso de ésta como único elemento conglomerante debido a sus características y su buen dialogo con los demás elementos de la composición. Siendo en total un 10%.



Fig. 51. Muestra NHL-5 en laboratorio

[19] Información obtenida del enlace

https://www.construmatica.com/construpedia/Cal_Hidr%C3%A1ulica

Posteriormente se llega a la conclusión de utilizar, al igual que en la Tesis de Tierra proyectada una fracción de cemento.

Cemento.

Es el producto resultante de la cocción de Caliza y Arcilla. Su nombre deriva de *caementum*, que en latín significa "argamasa", y procede a su vez del verbo *caedere* (precipitar). Se trata del conglomerante más importante que podemos encontrar en la actualidad. Los Cementos se emplean principalmente en la fabricación de Morteros y Hormigones. También se utiliza mezclado con agua en pequeños trabajos y reparaciones. [20]

En nuestro caso, junto con la cal hidráulica se ha previsto su uso en un 1% como cemento blanco de 52.5mPa. Para aportar la resistencia inicial de la cual la cal no posee.



Fig. 52. Muestra Bl 1 52.5 Mpa

5.1.1.4 Aditivos. Se han empleado un tipo, que ha intervenido en una última fase del estudio; un fluidificante que se ha utilizado en la última proyección, para disminuir la cantidad de agua necesaria para proyectar, (marca registrada SIKAS.A). [21]



Fig. 53. Fluidificante utilizado en proyección

5.1.2 Tipos de mezclas

Para una primera aproximación, se hizo el ensayo granulométrico de la tierra base, con el fin de hacer una aproximación para compararla a la Tierra madre utilizada en el estudio de la tesis de tierra proyectada, con la intención de tener un punto de comparación y aproximación fiable a resultados reales obtenidos.

Enfocado a obtener su humedad óptima y densidad máxima se realizaron en un primer momento, probetas con humedades de un 1%, 2.5%, 5%, 7.5%, 9% y 10.5% que posteriormente se utilizarán para determinar su resistencia.

[20] Información obtenida del enlace

<https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento>

[21] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010). Apartado 4.1. Aditivos



Fig. 54. Probetas compactadas con proctor normal de sólo tierra

Un proctor normal con un total de 4 puntos. Con la misma composición, además de ensayos de textura y plasticidad.



Fig. 55. Proctor normal sólo Tierra

5.1.2.1 Estudio de las dosificaciones

Tierra + Aglomerantes

Para esta dosificación se han tomado los datos obtenidos en la tesis de tierra proyectada que se han realizado.

Tal y como dice en la documentación, la cal se ha utilizado desde tiempos remotos debido al aporte de durabilidad que da al sistema constructivo.

Bajo este punto de vista se inició fabricando probetas proctor con distintas adiciones de cal, sin la adición de ningún otro producto, con vistas a establecer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las diferentes mezclas, y en base a ello determinar, al menos en primera instancia, es decir, antes de las primeras pruebas de proyección, el contenido en cal más idóneo.

Para ello, en primer lugar se determinaron las humedades óptimas y las densidades máximas mediante la realización de ensayos proctor normal y modificado (aunque en esta investigación sólo se hayan realizado con ensayos proctor) con diferentes contenidos de cal, y de las probetas resultantes se obtuvieron en cada una de ellas la densidad, humedad y resistencia mecánica.

Se exponen los resultados anteriores, para mezclas con adición de cal del 2 a 20%, referidas al peso seco de la muestra madre.

Como es de esperar al realizar los ensayos con carbonatación la resistencia es mayor, debido al activo que la cal hace como agente cementante. Por todo el estudio hecho, se entiende como el 8% de cal el contenido óptimo para la preparación de la Materia Madre a efectos de ser proyectada pues la resistencia que se consigue con el Proctor Normal y con carbonatación se estabiliza en torno a los 40 Kg/cm², que se entiende como muy adecuada para cumplir con la ley centrífuga, poseer un sistema poroso que facilita el acceso del CO₂ y en general la permeabilidad a los gases, aportando, consecuentemente, al material proyectado un alto grado de durabilidad. A esto se le añaden estudios de cal+cemento en proporciones hasta el 4% de cemento, sin embargo aunque el aumento de resistencia es significativo, el añadido de cemento sólo pretende dar una temprana resistencia, siendo la cal la principal responsable de dar resistencia y durabilidad a largo plazo, según su proceso de carbonatación. [22]

Tierra + caucho

Una vez encontrada la humedad óptima y densidad máxima de la tierra se hizo un estudio de TIERRA BASE + NFU (con fibra textil) + AGUA en diferentes proporciones, con la intención de obtener una proporción óptima. Para ello se realizaron ensayos proctor normal con las siguientes proporciones:

- Tierra + 5% NFU en humedades entre el 5% y el 20%
- Tierra + 10% NFU en humedades entre el 5% y el 20%
- Tierra + 15% NFU en humedades entre el 5% y el 20%
- Tierra + 20% NFU en humedades entre el 5% y el 20%
- Tierra + 30% NFU en humedades entre el 5% y el 20%



Fig. 56. Ensayo proctor normal Tierra + caucho en diferentes proporciones

[22] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010). Apartado 5.2. Estudio de las diferentes mezclas. Aproximación a la mezcla óptima.

Tierra + caucho + aglomerantes

Una vez estudiadas las posibles combinaciones de Tierra + caucho se establecieron 3 mezclas con objeto de establecer la más idónea:

- Tierra + 10% caucho
- Tierra + 20% caucho
- Tierra + 30% caucho

Con estas 3 posibles combinaciones, teniendo como referencia la tesis doctoral de Tierra proyectada y la experiencia de los tutores se llegó a la conclusión de la utilización de las combinaciones anteriormente citadas más 10% de NHL-5, (para esto se hicieron en laboratorio un total de 6 probetas, 2 de cada proporción + 10% de NHL-5), estas probetas fueron fabricadas en compactación de proctor normal, con la intención de ser rotas a compresión posteriormente para su comparación con las probetas que posteriormente se lograran de la proyección.

De estas 6 probetas, 3 fueron sometidas a condiciones específicas de carbonatación, con una Humedad en torno al 60%, una Tª entre 20 y 25°C y entre un 1-3% de CO₂ en cámara, durante 7 días, las otras 3 probetas expuestas a temperatura ambiente y condiciones normales, con el fin de ver la variación entre ellas.



Fig. 57. Probetas Tierra + Caucho + aglomerante



Fig. 58. Cámara de CO₂ condiciones específicas (carbonatación acelerada)

Posteriormente se consideró aconsejable, añadir a la cal NHL-5 un 1% de BL1 52.5, con la finalidad de obtener mayor resistencia a corto plazo. De esta manera se obtuvieron 6 probetas más con las mismas dosificaciones y humedades con la intención de ser comparadas con las probetas ya fabricadas de Tierra + caucho + NHL-5, y las probetas extraídas de la proyección final con la diferentes proporciones. Estas probetas fueron sometidas a las mismas condiciones descritas anteriormente para las probetas de Tierra + caucho + NHL-5.

5.2 Selección de las mezclas óptimas M1, M2, M3

Para la obtención de las mezclas óptimas fue fundamental el estudio de la humedad óptima de la tierra para poder compararla con los resultados obtenidos de la Tesis doctoral de Tierra proyectada.

En base a esto se procedió a calcular las humedades óptimas y densidad máxima referente a combinación Tierra + caucho, como se ha explicado anteriormente, de donde se obtuvieron los siguientes datos:

Muestra	Densidad máxima	Humedad óptima%
Tierra	2,0195	10,6
Tierra+5%caucho	1,92	9,75
Tierra+10%caucho	1,83	11,3
Tierra+15%caucho	1,731	11,5
Tierra+20%caucho	1,638	11,55
Tierra+30%caucho	1,56	11,6

Tabla 2. Resumen densidad máxima y Humedad óptima para diferentes proporciones de Tierra + Caucho

Esta información sirvió de referencia para tomar la decisión de proyectar con 3 mezclas posibles, ya que como es de observar al aumentar la proporción de caucho disminuía su densidad, y pasado el 10% de residuo añadido tendía a permanecer constante la humedad óptima. El cálculo de la Humedad óptima fue la que sirvió de referente para calcular la proporción de agua necesaria en las mezclas finales.

Por lo que las dosificaciones finales en proporción Tierra + caucho+ aglomerante + agua, son:

Dosificación	Tierra gr	Caucho gr	Agua ml	NHL5 10% gr	BL 1 52,5 1% gr
M1 CAUCHO 10%	60000	6000	6780	6000	600
M2 CAUCHO 20%	60000	12000	6930	6000	600
M3 CAUCHO 30%	60000	18000	6960	6000	600

Tabla 3. Dosificaciones finales
TIERRA + CAUCHO+ AGLOMERANTES+AGUA

6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1 Aportación de datos físicos, químicos y mecánicos obtenidos en otras investigaciones sobre este tipo de suelos procedentes de la F. Alhambra

Construcciones de tierra. El Tapial. Nuevo sistema para construcción y restauración mediante la técnica de «TIERRA PROYECTADA»

Se pueden sacar las propiedades de la tierra de formación Alhambra, la cual, llega a la conclusión que, añadiendo un 8% de cal y 2% de CEM, junto con una humedad óptima de 10% y una densidad máxima en torno al 2g/cm³, se alcanza una relación de porosidad idónea la que aporta durabilidad al sistema, la cantidad de cemento añadida viene ad otra a la mezcla de una resistencia temprana a cortas edades, punto que dota a la mezcla de una mayor densidad. El agua necesaria para proyectar el sistema, influye en la resistencia, para esto se ha optado por añadir un

fluidificante con la intención de usar menos cantidad de agua y que la mezcla preparada para proyectar pudiese llegar a ser más cercano a la preparada en laboratorio.

Las muestras sometidas a ensayos proceden de 4 tomas que se disponían en el laboratorio.

Además de esto, se llegó a la conclusión de ser proyectada en vía húmeda resultaría más eficiente. Con el sistema desarrollado en la tesis se logran resultados en positivo debido a su respuesta a la resistencia (la cual varía sólo en un 15%) y las características obtenidas final del material puesto en obra son satisfactorias, las propiedades ofrecidas por el árido son eficientes debido a la facilidad que aporta en la proyección y la disminución de finos en la proporción de la mezcla, consecuencia de un mejor comportamiento frente a la retracción.

Textura y Plasticidad

Siguiendo la normativa que lo regula se procede al análisis granulométrico de las muestras antes citadas, en 12 tamices, entre el 125 y el 0.063 UNE, cuyas aberturas van disminuyendo en progresión geométrica de razón 2; para determinar el tamaño máximo se ha incluido la serie complementaria, tamices 40, 20 y 10 UNE. De donde se obtienen las siguientes gráficas:

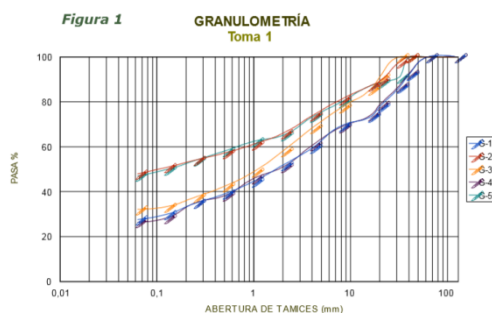


Fig. 59. Granulometría 1 (Fuentes, R. 2010)

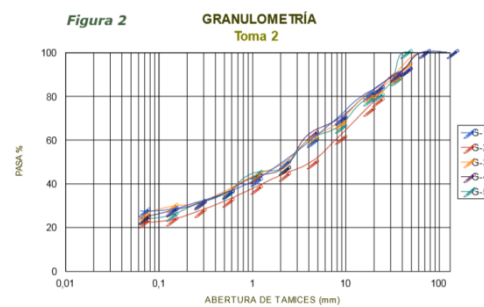


Fig. 60. Granulometría 2 (Fuentes, R. 2010)

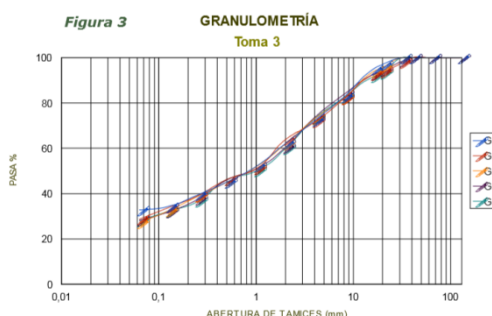


Fig. 61. Granulometría 3 (Fuentes, R. 2010)

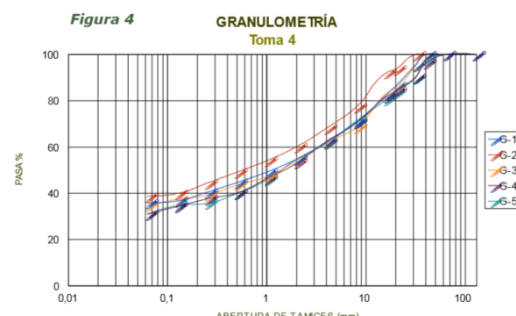


Fig. 62. Granulometría 4 (Fuentes, R. 2010)

Este ensayo, en conjunto con los Límites de Atterberg puede dar una clasificación del suelo, del cual se obtiene una clasificación de predominantemente arenoso con finos de baja-media plasticidad representados. Que vienen determinados en la tabla siguiente:

Tabla 2

		Tam. Máx	Mód. Granul.	D60	D30	D10	D60/D10	D30 ² /D60D10	%PASA Tam 5	%PASA Tam 0,08	Clasif. Casagrande
TOMA 1	G1	40	4,12	4,2	1,3	-	-	-	62	28	GC
	G2	31,5	2,97	0,85	-	-	-	-	77	48	SC
	G3	20	3,49	2,3	-	-	-	-	72	32	SC
	G4	40	4,01	3,8	1,6	-	-	-	64	26,5	SC-SM
	G5	31,5	2,79	0,65	-	-	-	-	76	47	SC-SM
TOMA 2	G1	40	4,14	4,2	0,8	-	-	-	62	27,5	GC-GM
	G2	40	4,61	7,8	2,7	-	-	-	52	22,5	GC
	G3	40	4,14	4	0,3	-	-	-	62	27,5	GC
	G4	40	3,85	3,4	1,2	-	-	-	62,5	24	SC-SM
	G5	40	4,28	4	1,2	-	-	-	65	25	SC
TOMA 3	G1	20	3,17	1,85	-	-	-	-	76	33	SC
	G2	31,5	3,23	1,65	0,08	-	-	-	75	30,5	SC-SM
	G3	20	3,21	1,85	0,9	-	-	-	76,5	29,5	SC
	G4	31,5	3,25	2	0,9	-	-	-	77	29,5	SC
	G5	20	3,29	2	0,9	-	-	-	76,5	29	SC-SM
TOMA 4	G1	31,5	3,74	3,4	-	-	-	-	66	36	SC
	G2	20	3,15	2	-	-	-	-	72	39,1	SC
	G3	31,5	3,16	3,4	-	-	-	-	65	36	SC-SM
	G4	31,5	3,84	3,4	-	-	-	-	66	33	SC
	G5	40	3,86	3,4	-	-	-	-	66	33,2	SC-SM

Tabla 4. Clasificación del suelo según muestras de referencia (Fuentes, R. 2010)

Es conveniente tener en cuenta que a mayor tamaño máximo del árido el rebote o rechazo aumenta, y que las arenas más finas favorecen la retracción. Se recomiendan arenas con módulo de finura entre 2,4 y 3,2 y con un 2% como mínimo de finos que pasen por el tamiz 0,008 UNE y entre el 8-12% de fracción inferior a 0,25 mm. Tanto el árido como el agua de amasado deberán cumplir con lo especificado en la EHE-08.

“Para finalizar se destaca que el suelo de esta investigación es de origen sedimentario y la forma predominante de las partículas es redondeada con todas las virtudes que ello supone para la puesta en obra debido al mejor resbalamiento a través de la manguera de bombeo, en detrimento de resistencias mecánicas. Todo suelo, y hablamos en concreto de éste, pudiera ser susceptible de mejoras hasta el total encaje, si bien se insiste en que el objetivo y a lo que va destinada la proyección de este material, es a la restauración de tapiales, por lo que se entiende que tiene cabida la muestra madre (MM) utilizada, ya que es la misma con la que se realizaron muchos de los tapiales en Granada, la cual se ha preparado para proyección, resultando resistencias mecánicas no muy elevadas, que son aconsejables además en este tipo de restauración, y un aspecto de la masa aportada con la misma textura y color de la tierra con la que construyeron, lo cual es fundamental en esta investigación y novedoso en cuanto la inexistencia de un planteamiento similar.

Higroscopicidad

Como ya sabemos la higroscopicidad, es la cantidad de agua que es capaz de retener una muestra de suelo en condiciones normales. De la Tesis de Tierra proyectada se obtuvieron los siguientes valores para las 4 muestras:

Tabla 8.- Porcentajes de higroscopicidad en las distintas tomas de la MM

	TOMA 1					TOMA 2				
	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5
Higroscopicidad	0,61	0,83	0,68	0,62	0,81	0,57	0,59	0,55	0,58	0,59

	TOMA 3					TOMA 4				
	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5
Higroscopicidad	0,59	0,57	0,59	0,60	0,55	0,57	0,56	0,58	0,57	0,56

Tabla 5. Ensayo de higroscopicidad en las muestras de referencia (Fuentes, R. 2010)

Ensayos de Compactación. PROCTOR NORMAL

En el Proctor Normal se pueden considerar una humedad óptima del 10% y una densidad máxima de 2,0g/cm³, como más características. De las 4 muestras estudiadas se obtienen los siguientes resultados:

Figura 36 PROCTOR NORMAL TIPO Material madre (MM). Toma 1 (T1)

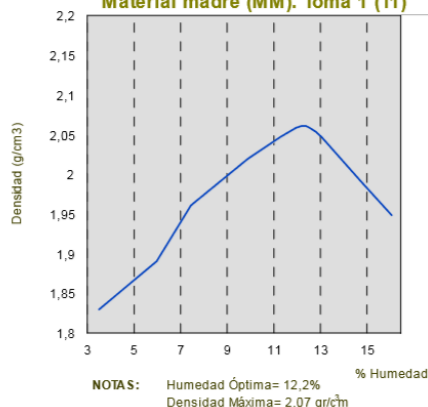


Fig. 63. Proctor Normal 1 (Fuentes, R. 2010)

Figura 37 PROCTOR NORMAL TIPO Material madre (MM). Toma 2 (T2)

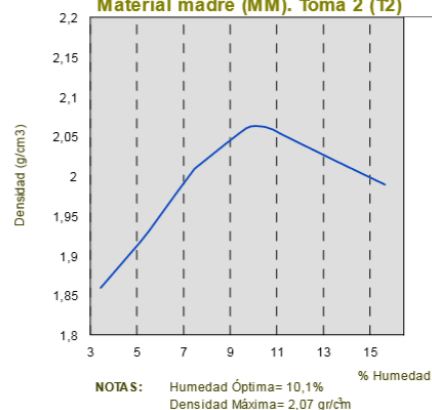


Fig. 64. Proctor Normal 2 (Fuentes, R. 2010)

Figura 38 PROCTOR NORMAL TIPO Material madre (MM). Toma 3 (T3)

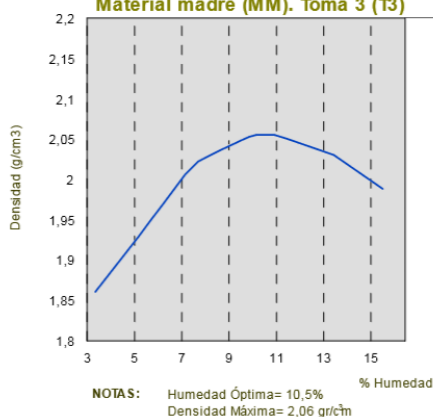


Fig. 65. Proctor Normal 3 (Fuentes, R. 2010)

Figura 39 PROCTOR NORMAL TIPO Material madre (MM). Toma 4 (T4)

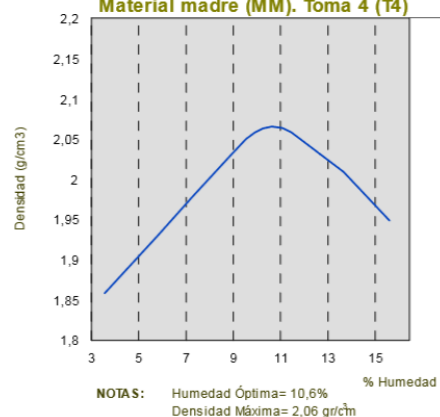


Fig. 66. Proctor Normal 4 (Fuentes, R. 2010)

Ensayos de Rotura. COMPRESIÓN SIMPLE

Todas las probetas fueron confeccionadas con Compactación del Ensayo Proctor Normal, todas ellas secadas en estufa y pesadas antes de su rotura. Han sido ensayadas no sólo las probetas con Humedad óptima

y densidad máxima, si no varias humedades de subida y bajada con la intención de crear una curva que relacione la densidad con la Resistencia. De las cuales se obtienen los siguientes resultados para las 4 muestras:

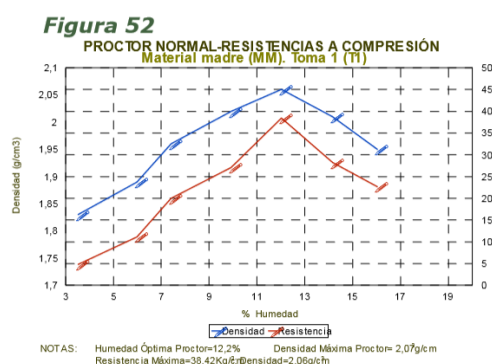


Fig. 67. Resistencia a compresión 1 (Fuentes, R. 2010)

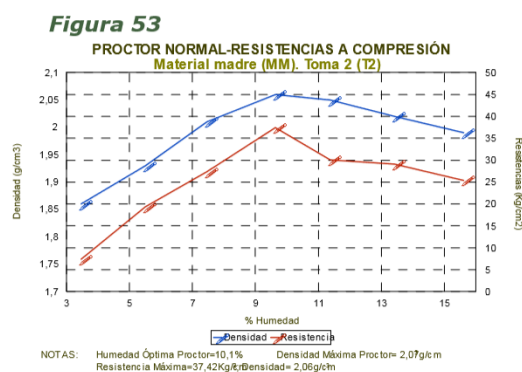


Fig. 68. Resistencia a compresión 2 (Fuentes, R. 2010)

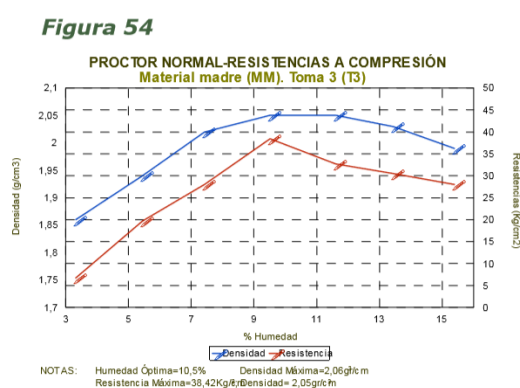


Fig. 69. Resistencia a compresión 3 (Fuentes, R. 2010)

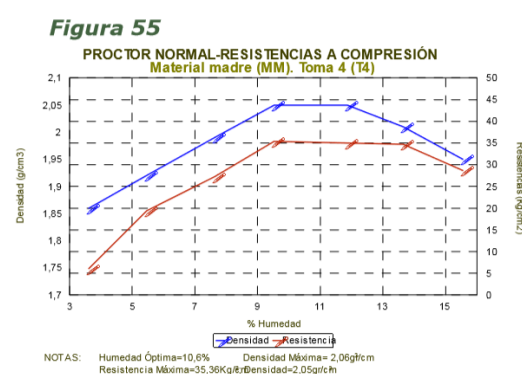


Fig. 70. Resistencia a compresión 4 (Fuentes, R. 2010)

Todas las probetas se rompieron a una edad de 28 días.

6.2 Comparación de los resultados de laboratorio de esta investigación con los ya existentes en suelo de referencia

Textura y Plasticidad

Siguiendo el ensayo explicado en el apartado 4.2.1.1 Ensayos Físicos. Textura y plasticidad, se ha hecho un estudio granulométrico de muestras en total:

- 2 muestras de tierra de formación Alhambra
- 2 muestras del polvo de caucho recibido de la empresa SIGNUS
- 1 muestra de Textil y otros residuos de la tercera muestra recibido de la empresa SIGNUS.

- Tierra de suelos edáficos de F. Alhambra
Para su facilidad en puesta en obra se han despreciado los valores máximos al tamiz de 20 mm, ya que impediría la proyección en la máquina. Como punto de partida tal y como se ha descrito en el apartado 4.2.1.1 Ensayos Físicos del apartado de identificación. Se han tomado 2 muestras a ser ensayadas para su análisis. De las cuales se ha logrado obtener la siguiente información:



Fig. 71. Granulometría Sólo Tierra

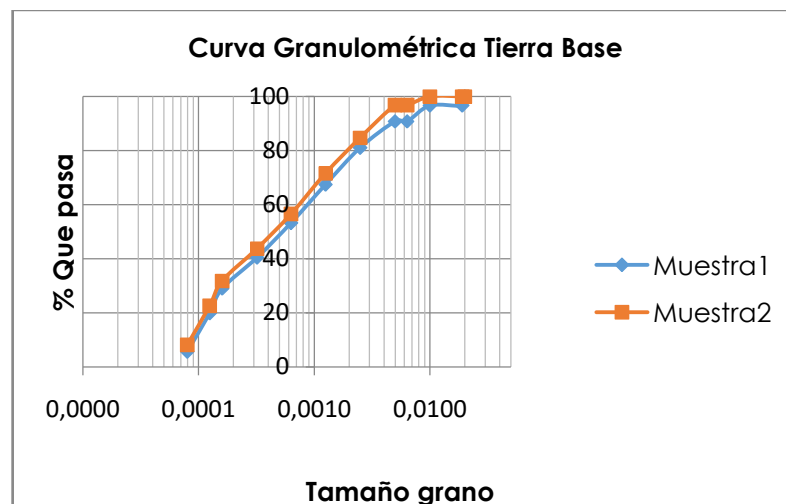


Fig. 72. Gráfico granulometría sólo Tierra

Con la intención de buscar C_u (Coeficiente de uniformidad), y teniendo en cuenta que:

Si $C_u < 5$ se considera un suelo uniforme

Si $5 < C_u < 20$ se considera poco uniforme

Y si $C_u > 20$ se considera un suelo bien graduado.

Obtenemos en nuestro caso un $C_u = 10$ para ambas muestras, lo que denota que el suelo es poco uniforme, además de esto, se denota una clara semejanza entre las muestras evaluadas, que aunque se presentan diferencias entre ellas, la curva dibujada es muy similar.

La cantidad de finos explica la diferencia de humedad óptima obtenida en este ensayo en comparación con la obtenida en el ensayo de mis compañeros de investigación.

Para una mejor comparación en calidad de textura entre las diferentes muestras de referencia y las estudiadas en esta investigación, se refleja en la siguiente tabla:

MUESTRA	Muestra 1	Muestra 2	Toma 1 (Fuentes)	Toma 2 (Fuentes)	Toma 3 (Fuentes)	Toma 4 (Fuentes)
Tam. Max	20,0	20,0	32,6	40,0	24,6	30,9
Mod. Granul	3,87	3,05	3,5	4,2	3,2	3,6
D60	1,3	1,3	2,4	4,7	1,9	3,1
D30	0,2	0,2	0,6	1,2	0,6	-
D10	0,1	0,1	-	-	-	-
D60/D10	10,0	10,0	-	-	-	-
D30^2/D60D10	0,2	0,2	-	-	-	-
% PASA Tam 5	90,8	96,7	70,2	60,7	76,2	67,0
% PASA Tam 0,08	5,7	8,2	36,3	25,3	30,3	35,5
Límite Líquido	26,5298	31,2137	-	-	-	-
Límite Plástico	14,5896	14,5896	-	-	-	-
Índice Plasticidad	11,9402	16,6241	-	-	-	-
Clasif. Casagrande	CL	CL	SC-SM	GC-SC	SC-CM	SC-CM

Tabla 6. Comparación Granulometría y Clasificación Casagrande sólo Tierra con Tesis Tierra Proyectada

Los datos anteriormente citados han sido tomados de la Tesis de Tierra Proyectada. (Fuentes, R. 2010), debido a que en sus ensayos de cada "Toma" tenía un total de 5 muestras se hizo una media entre los valores de cada Toma para obtener cada parámetro.

Como era de esperar debido al primer tamizado hecho en laboratorio, donde se pasaba por el tamiz 10mm, la cantidad de materia mayor a ésta en los ensayos nuevos de laboratorio no se ha tenido en cuenta, lo que en conjunto ha de formar un suelo diferente al obtenido por los ensayos de referencia, por otra parte es de recordar que los suelos ensayados en esta investigación, pertenecen a suelos edáficos de la F. Alhambra, por lo que sus propiedades físicas tienen previsible desviaciones.

De la tabla comparativa anterior se puede observar la diferencia en su composición, siendo el suelo referente a esta investigación, un suelo mal graduado, con una cantidad de finos inferior al de la F. Alhambra (Suelo patrón), además de una clara dispersión en proporciones conjuntas. Se clasifican como Arcillas de baja plasticidad, según la Clasificación de Casagrande.

- Polvo de caucho

La muestra objeto de estudio de suelos edáficos de la F. Alhambra se caracteriza por tener entre un 5-8.5% de finos, como se ha observado anteriormente, en comparación con la granulometría obtenida las muestras de caucho, resulta un descenso importante en el contenido de finos, entre el 2.8-3%.



Fig. 73. Granulometría Polvo de caucho

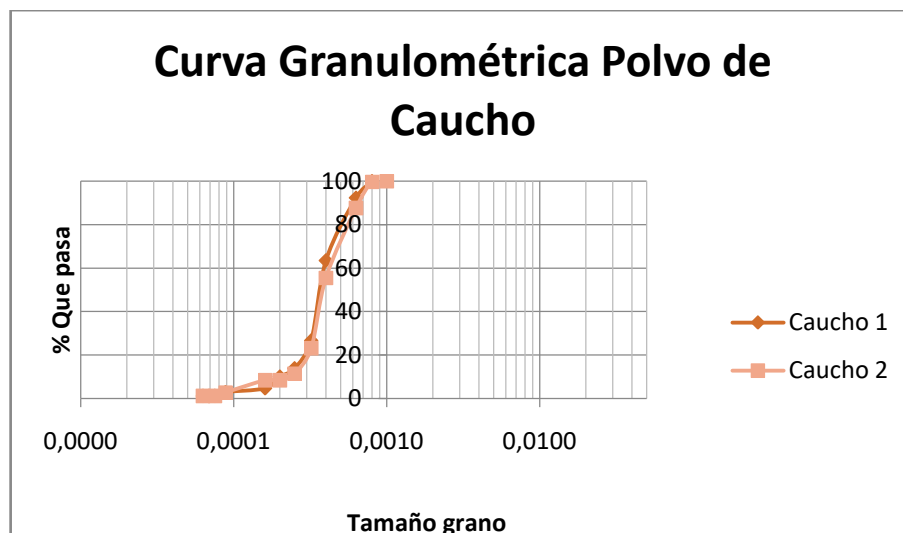


Fig. 74. Gráfico granulometría Polvo de Caucho

- Polvo de caucho + Textil

Debido a la diferencia de finos se consideró la caracterización del residuo textil, diferente al residuo de Polvo de caucho, con la intención de aportar sustituyendo parte de su contenido, características que mejoraran la proyección, puesta en obra y duración del sistema constructivo, además de la búsqueda de una mayor proporción similar en la granulometría entre Tierra + Caucho + Residuo Textil, Para esto se trabajó en una proporción 50-50 caucho textil y polvo de caucho (ha de tenerse en cuenta que el residuo procedente de la extracción de textil, como se explica en el punto 3.1 de la presente investigación en el proceso SIGNUS.



Fig. 75. Granulometría caucho + Textil

De este residuo mezcla se obtuvo la siguiente clasificación:

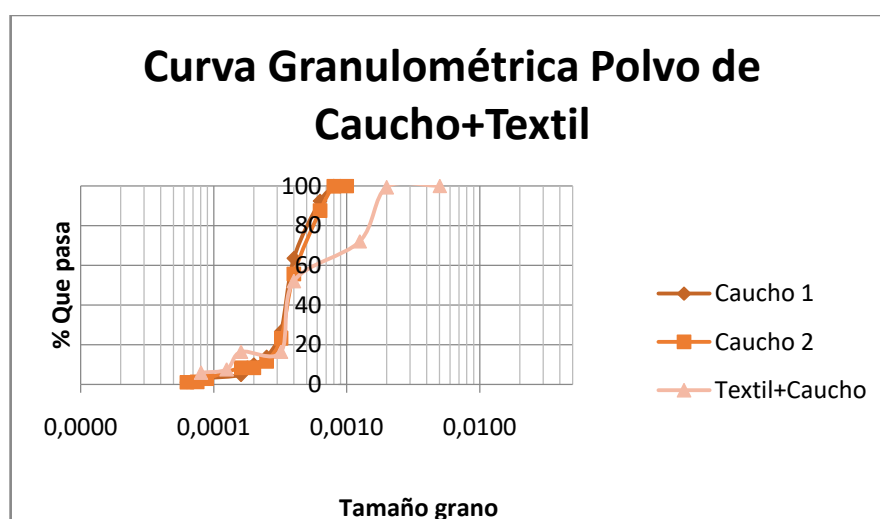


Fig. 76. Gráfico granulometría Polvo de Caucho + Textil

En la gráfica se aprecia en comparación con el polvo de caucho una mayor dispersión, en los tamaños intermedios, pero mayor similitud en la cantidad de finos con la Tierra base.

Haciendo una comparación Tierra – Caucho – Textil se obtiene la siguiente tabla:

MUESTRA	Muestra 1	Muestra 2	Polvo de Caucho 1	Polvo de Caucho 2	Polvo de Caucho + Textil
Tam. Max	20,00	20,00	0,80	1,00	5,00
Mod. Granul	6,71	7,13	3,16	3,99	3,70
D60	1,25	1,25	0,40	0,52	1,25
D30	0,16	0,16	0,32	0,32	0,56
D10	0,13	0,13	0,20	0,25	0,13
D60/D10	10,00	10,00	2,00	2,06	10,00
% PASA Tam 5	90,78	96,74	-	-	76,20
% PASA Tam 0,08	5,68	8,17	100,00	99,73	5,95

Tabla 7. Comparación Granulometría TIERRA – POLVO DE CAUCHO –POLVO DE CAUCHO+TEXTIL

Como es de esperar, el polvo de caucho, por su textura de 0-0.08mm, en comparación con la Tierra utilizada, contiene una proporción de finos mucho mayor. Por otra parte, la curva granulométrica del Polvo de caucho+Textil se asemeja en mayor proporción a las de tierra, siendo su comportamiento y sus propiedades bastante diferentes.

En el apartado 6.1 en la aportación de los datos de referencia se entiende que el Ensayo de granulometría, por sí solo, no aporta información referente, al comportamiento del suelo, sin embargo ha servido para comparar los dos suelos diferentes y caracterizarlos con la adición del residuo.

Siguiendo el ensayo explicado en el apartado 4.2.1.1 Ensayos Físicos. Textura y plasticidad, se ha hecho un estudio de Plasticidad. Para el estudio de la plasticidad y límites de consistencia, ya que no tiene sentido hacer este ensayo al residuo de caucho, se ha hecho el ensayo sólo a la tierra, para intentar hacer una caracterización y poder compararla con los suelos de referencia.

Para el cálculo del límite líquido, se han utilizado las muestras procedentes de los ensayos de granulometría.



Fig. 77. Cuchara Casagrande

Tabla 8. Muestra 1.

LÍMITE LÍQUIDO				
Número de golpes	23	20	23	29
Tara número	A1	A2	A3	m23
Tara+suelo+Agua	34	39,5	61,9	60,19
Tara+suelo	32,2	36,4	58,2	57,1
Tara	25,4	25,5	44	45,2
s Suelo	6,8	10,9	14,2	11,9
a Agua	1,8	3,1	3,7	3,09
% Humedad	26,4706	28,4404	26,0564	25,9664
Limite Liquido	26,2049	27,6827	25,7948	26,4369

Tabla 8. Ensayos para obtención del LL de muestra 1

Tabla 9 Muestra 2.

LÍMITE LÍQUIDO			
Número de golpes	17	24	29
Tara número	M21	M22	M23
Tara+suelo+Agua	69,2	65,4	60,19
Tara+suelo	61,8	57,6	57,1
Tara	45,8	43,3	45,2
s Suelo	16	14,3	11,9
a Agua	7,4	7,8	3,09
% Humedad	46,25	54,54	25,97
Limite Liquido	44,14	54,28	26,44

Tabla 9. Ensayos para obtención del LL de muestra 2

Siguiendo la normativa en la primera muestra se ha obtenido puntos por debajo de 25 golpes al igual que por encima para hacer una aproximación lo más certera posible. Con la obtención de un LL de **26,5298 para M1** y **31,2137 para M2**.

Para el cálculo del Límite Plástico se ha utilizado el mismo suelo que para el limite liquido en la fracción granulométrica correspondiente.

LÍMITE PLÁSTICO		
Tara número	1	2
Tara+suelo+Agua	30,9	46,3
Tara+suelo	30,2	46,2
Tara	25,5	45,5
s Suelo	4,7	0,7
a Agua	0,7	0,1
% Humedad	14,89361702	14,28571429

Tabla 10. Ensayos para obtención del LP

De donde se obtiene un **Límite Líquido** medio de **14,5896**.

Para en conjunto, un **Índice Plástico** de **11,9401**.

Estos valores han sido comparados con los suelos patrón (Tabla 6).
Comparación Granulometría y Clasificación Casagrande sólo Tierra con Referencia.

Humedad Higroscópica

De las muestras ensayadas se obtiene la siguiente tabla:

	Muestra 1	Muestra 2	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4
Higroscopicidad	0,8038	0,1876	0,71	0,576	0,58	0,568

Tabla 11. Comparación Humedad Higroscópica sólo Tierra con Tesis Tierra Proyectada

De ésta cabe destacar la diferencia entre de las dos muestras, esto se debe a que la primera fue evaluada una vez sacada del acopio en bolsas de 20Kg. Tras su extracción, cuarteado y tamizado. La muestra 2 fue evaluada, estando previamente a temperatura ambiente, a fin de establecer la posible influencia de la humedad higroscópica. Todos estos resultados manifiestan la baja higroscopicidad del material.

Ensayos de Compactación. PROCTOR NORMAL.

Tal y como se describe en el apartado 4.2.1.1 Ensayos de identificación Físicos, en el subapartado Ensayo de compactación. Proctor normal. Se ha seguido en todo momento lo planteado en la normativa UNE103-500-94. Para ello se han ensayado:

- Proctor Normal Tierra Base, con humedades ascendentes comprendidas entre el 5-15%
- Proctor Normal Tierra Base + 5% Residuo Textil y Caucho
- Proctor Normal Tierra Base + 10% Residuo Textil y Caucho
- Proctor Normal Tierra Base + 15% Residuo Textil y Caucho
- Proctor Normal Tierra Base + 20% Residuo Textil y Caucho

Proctor Normal Sólo Tierra

La primera aproximación ha sido ensayar la tierra con la intención de obtener un punto de partida para poder comparar con la Tesis de Tierra Proyectada. De este ensayo se han obtenido los siguientes resultados:

DENSIDAD SECA	TIERRA BASE	Punto nº	1	2	3	4
	% agua añadida					
	t+s+a	Molde+suelo+agua	4.708,00	4.847,40	4.928,00	4.874,90
	t	Molde	2.686,20	2.686,20	2.686,20	2.686,20
	s+a=(t+s+a)-t	suelo + agua	2.021,80	2.161,20	2.241,80	2.188,70
	V	volumen	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
	s=(s+a)100/(100+w)	Suelo	1.919,28	1.988,46	2.014,81	1.906,02
	pd=s/V	Densidad seca	1,92	1,99	2,01	1,91

Tabla 12. Proctor Normal sólo Tierra. Densidad Seca

HUMEDAD	Referencia tara		1,00	2,00	3,00	4,00
	t+s+a	Tara+suelo+agua	230,90	192,40	195,40	364,00
	t+s	Tara+suelo	223,00	183,40	183,30	340,30
	t	Tara	75,10	79,80	75,90	180,50
	s=(t+s)-t	Suelo	147,90	103,60	107,40	159,80
	a=(t+s+a)-(t+s)	Agua	7,90	9,00	12,10	23,70
	w=(a/s)100	Humedad	5,34	8,69	11,27	14,83

Tabla 13. Proctor Normal sólo Tierra_ Humedad

De donde se han obtenido los siguientes resultados:

DENSIDAD MÁXIMA	2,0195
HUMEDAD ÓPTIMA	10,6

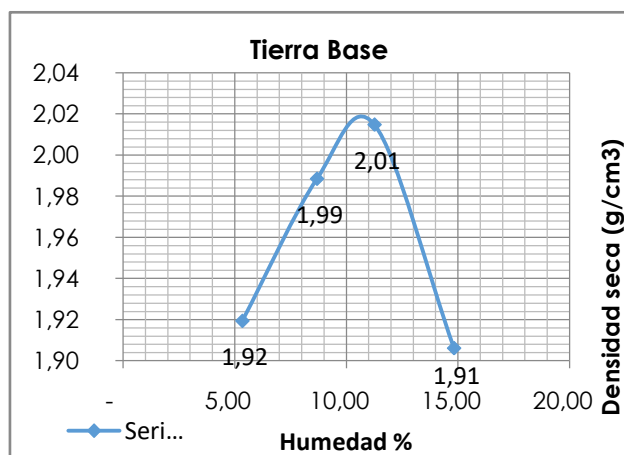


Fig. 78 Gráfico Representación Proctor Normal Sólo Tierra



Fig. 79. Realización. Proctor Normal Sólo Tierra



Fig. 80. Obtención muestras. Proctor Normal Sólo Tierra

Como se aprecia en la información aportada se registran 4 puntos en los que 2 pertenecen a la subida y dos a la bajada. De estos datos se obtiene la humedad óptima y densidad máxima, información necesaria para la caracterización del suelo y comparación.

Muestra	Humedad óptima %	Densidad máxima	Resistencia a compresión Kg/cm²
Tierra Base	10,6	2,02	37,50
Toma 1	12,2	2,07	38,42
Toma 2	10,1	2,07	37,42
Toma 3	10,5	2,05	38,42
Toma 4	10,6	2,05	35,36

Tabla 14. Comparación Proctor normal. + Resistencia a compresión. Tierra Base- Tesis Tierra Proyectada (Toma 1-4)

Debido a que la prueba de Resistencia a Compresión se ha realizado con las mismas probetas, en la tabla se ha considerado también oportuno aportar el parámetro mecánico. Se puede observar una clara similitud en propiedades como Humedad óptima y densidad máxima, sin embargo se denota una menor resistencia en la tierra base.

En busca de encontrar la proporción idónea, objetivo de este trabajo en Tierra + Caucho Textil, se realizaron los siguientes ensayos, tal como se indica al principio de este apartado:

Proctor Normal Tierra Base + 5% Residuo Textil y Caucho, con humedades ascendentes comprendidas entre el 5-20%.

DENSIDAD SECA	5%	Punto nº	1	2	3
	$t+s+a$	% agua añadida			
	t	Molde+suelo+agua	4.539,60	4.786,90	4.756,90
	$s+a=(t+s+a)-t$	Molde	2.686,20	2.686,20	2.686,20
	V	suelo + agua	1.853,40	2.100,70	2.070,70
	$s=(s+a)100/(100+w)$	volumen	1.000,00	1.000,00	1.000,00
	$pd=s/V$	Suelo	1.772,48	1.918,95	1.819,91
		Densidad seca	1,77	1,92	1,82

Tabla 15. Proctor Normal Tierra+5% Residuo_ Densidad Seca

HUMEDAD		Referencia tara	1,00	2,00	3,00
	t+s+a	Tara+suelo+agua	146,20	180,00	169,40
	t+s	Tara+suelo	143,10	171,40	158,10
	t	Tara	75,20	80,60	76,10
	s=(t+s)-t	Suelo	67,90	90,80	82,00
	a=(t+s+a)-(t+s)	Agua	3,10	8,60	11,30
	w=(a/s)100	Humedad	4,57	9,47	13,78

Tabla 16. Proctor Normal Tierra+ 5% Residuo_ Humedad

DENSIDAD MÁXIMA	1,92
HUMEDAD ÓPTIMA	9,75

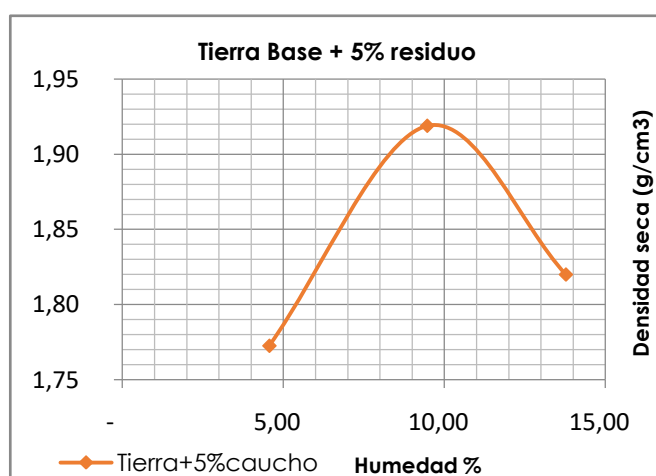


Fig. 81 Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 5% Residuo



82. Realización Proctor Normal Tierra + 5% Residuo



Fig. 83. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 5% Residuo

Proctor Normal Tierra Base + 10% Residuo Textil y Caucho, con humedades ascendentes comprendidas entre el 5-20%.

DENSIDAD SECA	10%	Punto n°	1	2	3	4
	$t+s+a$	% agua añadida				
	t	Molde+suelo+agua	4.464,30	4.700,00	4.695,00	4.585,00
	$s+a=(t+s+a)-t$	Molde	2.686,20	2.686,20	2.686,20	2.686,20
	V	suelo + agua	1.778,10	2.013,80	2.008,80	1.898,80
	$s=(s+a)100/(100+w)$	volumen	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
	$pd=s/V$	Suelo	1.684,26	1.816,12	1.780,06	1.594,91
		Densidad seca	1,68	1,82	1,78	1,59

Tabla 17. Proctor Normal Tierra+10% Residuo_ Densidad Seca

HUMEDAD		Referencia tara	5,00	10,00	15,00	20,00
	t+s+a	Tara+suelo+agua	266,48	312,44	381,45	402,36
	t+s	Tara+suelo	260,40	299,50	364,30	362,50
	t	Tara	151,28	180,62	230,84	153,30
	s=(t+s)-t	Suelo	109,12	118,88	133,46	209,20
	a=(t+s+a)-(t+s)	Agua	6,08	12,94	17,15	39,86
	w=(a/s)100	Humedad	5,57	10,88	12,85	19,05

Tabla 18. Proctor Normal Tierra+ 10% Residuo_ Humedad

DENSIDAD MÁXIMA	1,83
HUMEDAD ÓPTIMA	11,3

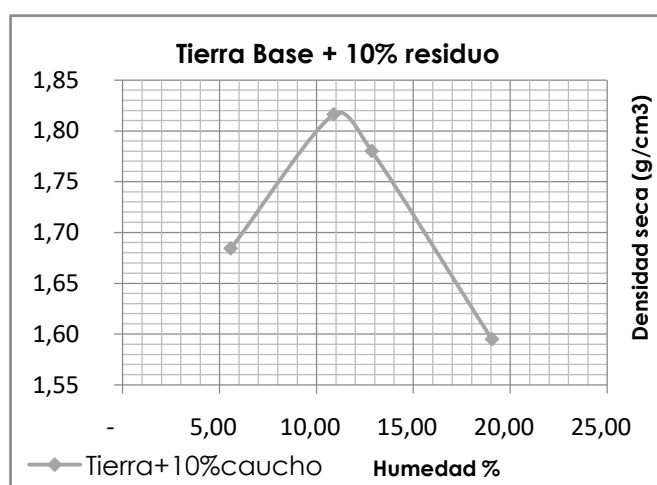


Fig. 84 Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 10% Residuo



Fig. 85. Realización. Proctor Normal Tierra + 10% Residuo



Fig. 86. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 10% Residuo

Proctor Normal Tierra Base + 15% Residuo Textil y Caucho, con humedades ascendentes comprendidas entre el 5-20%.

DENSIDAD SECA	15%	Punto n°	1	2	3	4
	$t+s+a$	% agua añadida				
	t	Molde+suelo+agua	4.351,80	4.607,40	4.567,80	4.491,70
	$s+a=(t+s+a)-t$	Molde	2.686,20	2.686,20	2.686,20	2.686,20
	V	suelo + agua	1.665,60	1.921,20	1.881,60	1.805,50
	$s=(s+a)100/(100+w)$	volumen	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
	$pd=s/V$	Suelo	1.570,33	1.728,40	1.645,19	1.504,58
		Densidad seca	1,57	1,73	1,65	1,50

Tabla 19. Proctor Normal Tierra+15% Residuo_ Densidad Seca

HUMEDAD		Referencia tara	5,00	10,00	15,00	20,00
	t+s+a	Tara+suelo+agua	126,10	164,80	173,30	137,90
	t+s	Tara+suelo	123,20	156,30	161,10	127,20
	t	Tara	75,40	80,10	76,20	73,70
	s=(t+s)-t	Suelo	47,80	76,20	84,90	53,50
	a=(t+s+a)-(t+s)	Agua	2,90	8,50	12,20	10,70
	w=(a/s)100	Humedad	6,07	11,15	14,37	20,00

Tabla 20. Proctor Normal Tierra+ 15% Residuo_ Humedad

DENSIDAD MÁXIMA	1,731
HUMEDAD ÓPTIMA	11,5

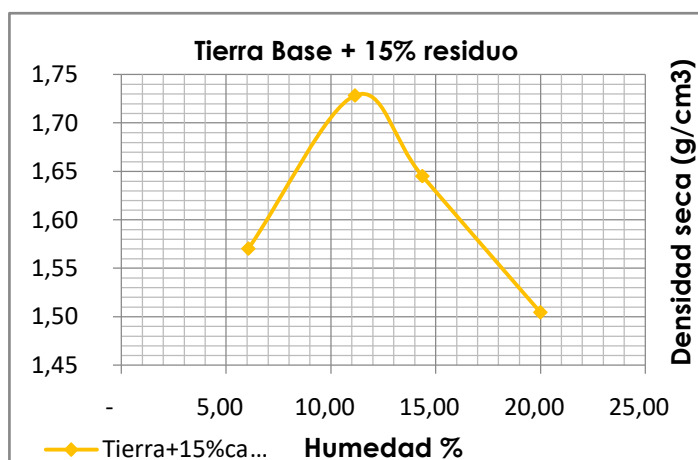


Fig. 87 Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 15% Residuo



Fig. 88. Realización. Proctor Normal Tierra + 15% Residuo



Fig. 89. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 15% Residuo

Proctor Normal Tierra Base + 20% Residuo Textil y Caucho, con humedades ascendentes comprendidas entre el 5-20%.

DENSIDAD SECA	20%	Punto n°	1	2	3	4
	$t+s+a$	% agua añadida				
	t	Molde+suelo+agua	4.297,30	4.492,70	4.522,70	4.454,20
	$s+a=(t+s+a)-t$	Molde	2.686,20	2.686,20	2.686,20	2.686,20
	V	suelo + agua	1.611,10	1.806,50	1.836,50	1.768,00
	$s=(s+a)100/(100+w)$	volumen	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
	$pd=s/V$	Suelo	1.531,42	1.636,24	1.580,01	1.467,39
		Densidad seca	1,53	1,64	1,58	1,47

Tabla 21. Proctor Normal Tierra+20% Residuo_ Densidad Seca

HUMEDAD		Referencia tara	5,00	10,00	15,00	20,00
	t+s+a	Tara+suelo+agua	216,00	280,70	276,23	222,70
	t+s	Tara+suelo	212,80	274,80	269,90	210,90
	t	Tara	151,30	218,10	230,90	153,30
	s=(t+s)-t	Suelo	61,50	56,70	39,00	57,60
	a=(t+s+a)-(t+s)	Agua	3,20	5,90	6,33	11,80
	w=(a/s)100	Humedad	5,20	10,41	16,23	20,49

Tabla 22. Proctor Normal Tierra+ 20% Residuo_ Humedad

DENSIDAD MÁXIMA	1,638
HUMEDAD ÓPTIMA	11,1

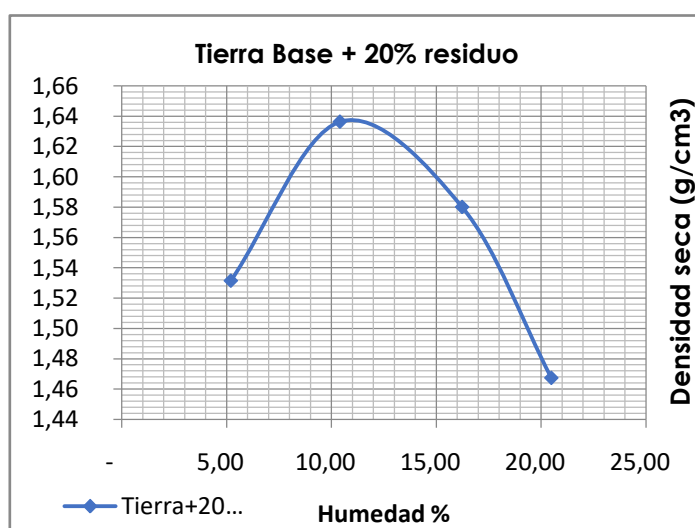


Fig. 90. Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 20% Residuo



Fig. 91. Realización. Proctor Normal Tierra + 20% Residuo



Fig. 92. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 20% Residuo

Proctor Normal Tierra Base + 30% Residuo Textil y Caucho, con humedades ascendentes comprendidas entre el 5-20%.

DENSIDAD SECA	30%	Punto n°	1	2	3	4
	$t+s+a$	% agua añadida				
	t	Molde+suelo+agua	4.163,70	4.328,90	4.431,50	4.346,60
	$s+a=(t+s+a)-t$	Molde	2.685,00	2.685,00	2.685,00	2.685,00
	V	suelo + agua	1.478,70	1.643,90	1.746,50	1.661,60
	$s=(s+a)100/(100+w)$	volumen	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
	$pd=s/V$	Suelo	1.385,46	1.498,49	1.557,72	1.411,31
		Densidad seca	1,39	1,50	1,56	1,41

Tabla 23. Proctor Normal Tierra+30% Residuo_ Densidad Seca

HUMEDAD		Referencia tara	5,00	10,00	15,00	20,00
	t+s+a	Tara+suelo+agua	120,50	128,50	127,90	137,40
	t+s	Tara+suelo	117,65	124,21	122,29	127,82
	t	Tara	75,30	80,00	76,00	73,80
	s=(t+s)-t	Suelo	42,35	44,21	46,29	54,02
	a=(t+s+a)-(t+s)	Agua	2,85	4,29	5,61	9,58
	w=(a/s)100	Humedad	6,73	9,70	12,12	17,73

Tabla 24. Proctor Normal Tierra+ 30% Residuo_ Humedad

DENSIDAD MÁXIMA	1,56
HUMEDAD ÓPTIMA	11,6

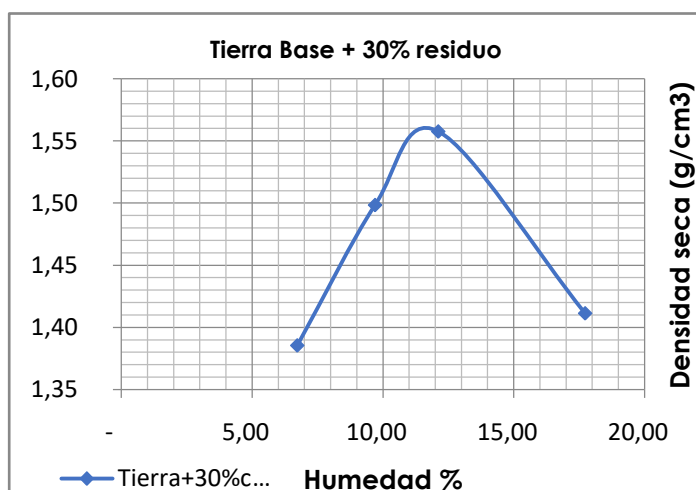


Fig. 93. Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 30% Residuo



Fig. 94. Realización. Proctor Normal Tierra + 20% Residuo

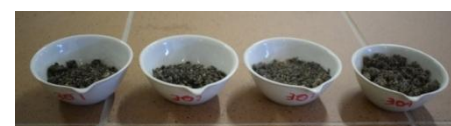


Fig. 95. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 30% Residuo

Haciendo una comparación entre los datos obtenidos según las diferentes proporciones y sus resistencias a compresión simple, se obtiene la siguiente tabla:

Muestra	Humedad óptima %	Densidad máxima g/cm ³
Tierra Base	10,6	2,02
Tierra +5% Residuo	9,75	1,92
Tierra +10% Residuo	11,3	1,83
Tierra +15% Residuo	11,5	1,731
Tierra +20% Residuo	11,55	1,638
Tierra +30% Residuo	11,55	1,56

Tabla 25. Comparación según proporciones de residuo



Fig. 96. Muestras ensayo proctor según diferentes proporciones

Como se puede observar, en la Tabla 25. Comparación según proporciones residuo, se hizo una comparación entre las diferentes proporciones de residuos desde un 5% hasta un 30%. Como era de esperar, sus propiedades varían según la composición. La humedad óptima tiende a estabilizarse aún con el aumento de residuo; sin embargo, la densidad va disminuyendo a medida que se añade residuo.

Ensayos de Rotura. COMPRESIÓN SIMPLE

Como se describe en el apartado 4.2.1.3 Ensayos Mecánicos (Compresión Simple), siguiendo la normativa aplicable, y con la intención de ver la variación de resistencia según la humedad del suelo, se realizaron 6 probetas como se describe en el apartado 5.1.2 (Tipos de mezclas en el estudio de la dosificación).

De donde se obtienen los siguientes datos:

Humedad %	Resistencia Kg/cm2
1%	7,88
2,50%	6,61
5%	18,70
7,50%	9,45
9%	12,59
10,50%	22,70

Tabla 26. Comparación Humedad – Resistencia.
Sólo Tierra

Esta información corrobora los datos obtenidos por el ensayo Proctor Normal, donde demuestra que la humedad óptima para una mayor resistencia es de 10.6%

De esta tabla se observa la siguiente gráfica:

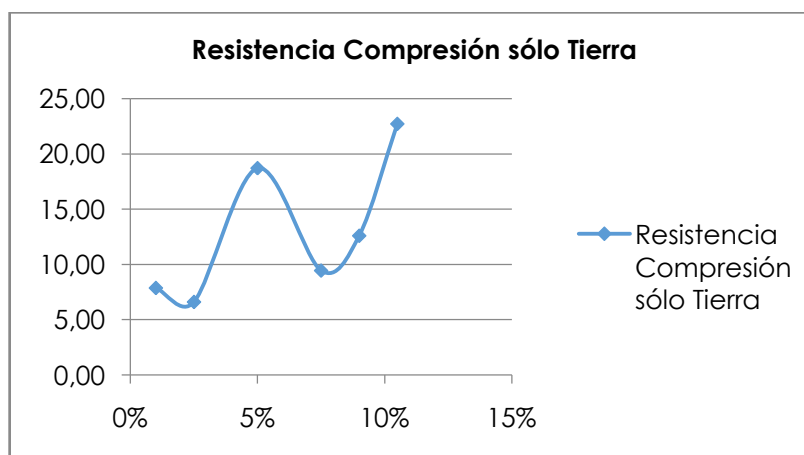


Fig. 57. Gráfico Humedad- Resistencia a compresión. Sólo Tierra

La comparación con el suelo patrón de F. Alhambra, se ha desarrollado en el momento de comparar la caracterización de los dos suelos, el de trabajo de la presente investigación y el de referencia.

Por otra parte, una vez obtenidas las proporciones idóneas de trabajo, teniendo en cuenta que no era muy claro aún la relación que ésta tenía con lo el enfoque que hemos llevado, se realizaron ensayos a compresión de las 3 proporciones siguientes:

- Tierra + 10% Residuo + 10% NHL-5 + 1% BL 1 52.5
- Tierra + 20% Residuo + 10% NHL-5 + 1% BL 1 52.5
- Tierra + 30% Residuo + 10% NHL-5 + 1% BL 1 52.5

Estas probetas, fueron puestas 3 en cámara de carbonatación acelerada, con la intención de comprobar su porosidad y grado de carbonatación, es decir, se realizaron 6 probetas con las proporciones anteriores (2 de cada una), con la cantidad de agua para intentar alcanzar su humedad óptima. Tres de ellas estuvieron durante 7 días en las condiciones especiales descritas en el apartado 4.2.1.2. y otras 3 dejadas en condiciones ambientales de laboratorio durante los mismos 7 días con la intención de ver su variación, de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Proporción Residuo	Cámara Carbonatación	Resistencia máxima Kg/cm ²
10%	si	5,888
10%	no	5,860
20%	si	3,209
20%	no	3,233
30%	si	1,967
30%	no	1,914

Tabla 27. Comparación. Resistencia a compresión Tierra + Residuo.



Fig. 98. Probetas Resistencia a compresión Tierra + Residuo

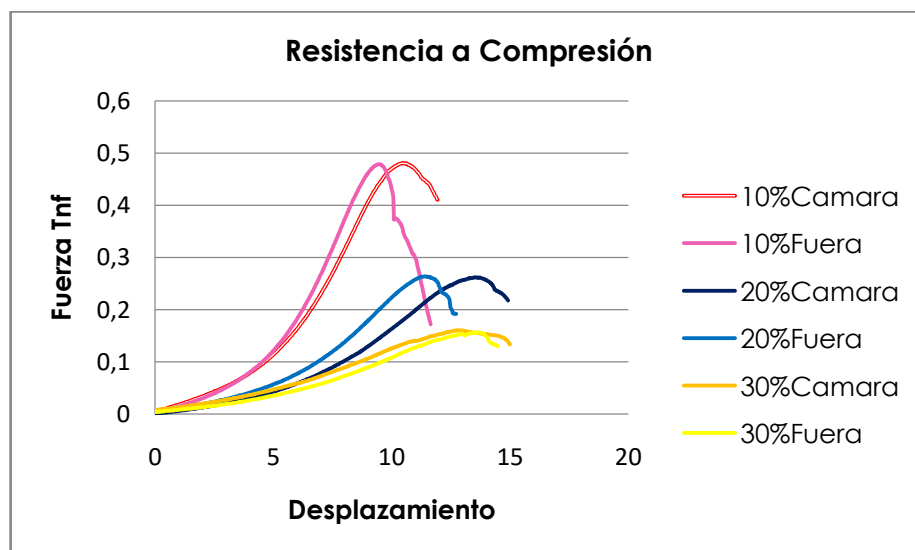


Fig.99. Gráfico comparación Tierra + Residuo

Lo que expresa que el contenido de residuo disminuye notoriamente las propiedades a compresión de la tierra, en cuanto mayor sea este, menor será la resistencia, sin embargo en busca de obtener y aprovechar las propiedades del caucho, en la dosificación de proyección se trató con un porcentaje intermedio, el 20%

Pruebas con Fenoltaleína

Una vez rotas las probetas del ensayo de Compresión Simple, se pudo observar la acción que producía el residuo en el conjunto.

- 2 con el 10% de Residuo
- 2 con el 20% de Residuo
- 2 con el 30% de Residuo



Fig. 100. 10% sin carbonatación



Fig. 101. 10% con cámara de carbonatación



Fig. 102. 20% sin carbonatación



Fig. 103. 20% con cámara de carbonatación



Fig. 104. 30% sin carbonatación



Fig. 105. 30% con cámara de carbonatación

De este ensayo, aunque solo cualitativamente, se pudo observar que las probetas que estuvieron en cámara de carbonatación forzada, habían carbonatado completamente, esto quiere decir que el material añadido agrega un contenido de poros importante al conjunto, por otra parte las probetas dejadas al exterior a una carbonatación a temperatura ambiente y condiciones ambientales del laboratorio, habían carbonatado sólo superficialmente.

Además de esto, se pudo observar lo que se vio reflejado en el ensayo a compresión, que el hecho de estar carbonatadas no implicaba a penas diferencia en la aportación de resistencia.

6.3 Análisis e interpretación de los resultados en muestras de Tierra proyectada

Aquí se incluyen todos los datos obtenidos tanto de la proyección de la Tierra aplicada a un soporte (MUESTRA TIPO A), como de las probetas obtenidas rellenando moldes con la misma composición de las diferentes amasadas que se proyectaron (MUESTRA TIPO B).

Resistencia a compresión simple

MUESTRA TIPO A.

Tal y como se explica en el apartado 4.2.2.3 (Extracción de muestras de los revestimientos aplicados al soporte y preparación de las probetas para ensayos) este tipo de muestras son extraídas del soporte una vez seco, y moldeadas con el fin de obtener probetas con medidas conocidas para poder ensayar. Este procedimiento se ha hecho tanto para la mezcla de solo tierra + aglomerantes como para tierra + aglomerante + residuo.

De este ensayo se obtiene la siguiente información:



Fig. 106. Probetas obtenidas del revestimiento ensayadas a compresión

	Tierra 1	Tierra 2	Tierra3	Tierra + Res1	Tierra + Res2	Tierra + Res3
Dimensiones	4x4x4	5x5x5	6x6x6	4x4x4	6x6x6	4x4x4
Resistencia máxima a compresión Kg/cm ²	3,43125	3,9	3,0125	1,09375	0,75	2,333333

Tabla 28. Comparación. Resistencia a compresión probetas extraídas soporte Sólo Tierra (Tierra 1. Tierra 2. Tierra 3) v Tierra + Residuo (Tierra + Res1. Tierra + Res2. Tierra + Res3)

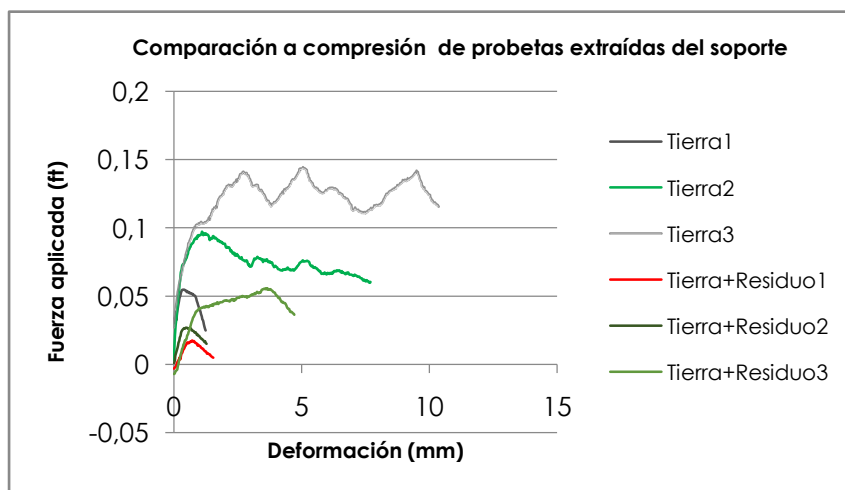


Fig. 107. Comparación a compresión probetas extraídas del soporte

Podemos observar cómo el comportamiento de la tierra es notablemente mejor una vez proyectado, sin embargo, se ha de mencionar que la extracción de las probetas debido a su procedimiento poco riguroso, y a la idea de que la mezcla no es completamente homogénea, puede variar notablemente, por esto se plantea como una futura línea el estudio de extracción de éstas, junto con la forma de ser evaluada.

MUESTRA TIPO B.

Estas probetas han sido obtenidas tras la preparación de las diferentes capas (amasadas) de proyección, encofradas en moldes para su posterior estudio una vez secas.

Probetas dimensiones 5x5

Dimensiones	Probeta	Resistencia Kg/cm ²
5x5	T1	2,972
5X5	T2	3,128
5X5	T3	2,288
5X5	T+C1	3,276
5X5	T+C2	3,024
5X5	T+C3	2,868
10X10	T	5,287
10X10	T+C	4,597



Fig. 108. Probetas MUESTRA TIPO B

Tabla 29. Comparación Resistencia a compresión

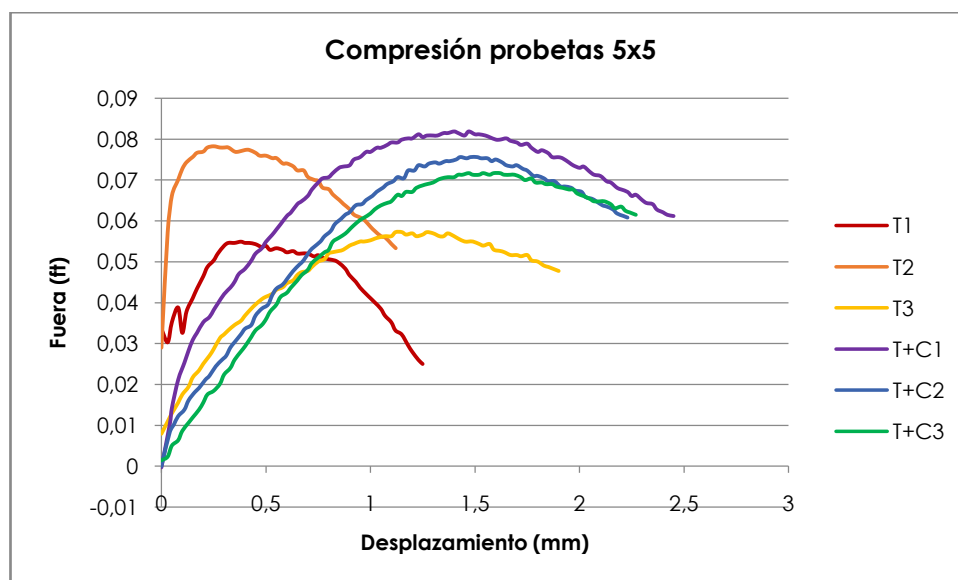


Fig. 109. Comparación a compresión probetas encofradas en moldes

De donde, T1, T2 y T3 son probetas de tierra de dimensiones 5x5 y T probeta de 10x10, obtenidas de la Muestra tipo b
T+C1, T+C2 y T+C3, son probetas de Tierra + Residuo de dimensiones 5x5 y T+C DE 10X10, obtenidas de la Muestra tipo b.

Entre las probetas de Tierra se puede ver cómo la resistencia varía entre 2.3Kg/cm² y 3.2 Kg/cm², al igual que se observa exactamente la misma variación entre probetas confeccionadas con Tierra + Residuo. Lo que denota que para las dosificaciones obtenidas la resistencia es muy similar. Las probetas 10x10 aportan una resistencia mayor debido a su producción, éstas han sido hechas directamente en molde, sin sufrir modificaciones a penas en su corte. Estas probetas fueron ensayadas con Fenolftaleína para comprobar su carbonatación. De la cual se obtuvo una carbonatación superficial en todas las probetas (Fig. 11).

Teniendo en cuenta la resistencia obtenida en probetas compactadas a ensayo proctor, las resistencias obtenidas fluctúan entre los 37 Kg/cm² por estas probetas sin compactar, simplemente vibradas, con una dosificación diferente y añadido de agua muy superior a la utilizada en el ensayo proctor, las resistencias son muy diferentes. Sin embargo el sistema utilizado de tierra proyectada alcanza casi las mismas resistencias entre los diferentes materiales. Los datos obtenidos a esfuerzo Flexión simple han sido mínimos, resultado que se esperaba, ya que la tierra no trabaja a tracción.

Ultrasonido

Este ensayo ha sido aplicado a las probetas procedentes de la Muestra TIPO B.

Velocidad ultrasonido (m/s)		
Longitud cm	Tierra	Tierra +Residuo 20%
39,50	96,55	24,69
10,00	104,06	79,74
10,00	106,55	89,77
5,00	83,06	57,47
5,00	84,75	64,52
5,00	89,77	62,50

Tabla 30. Velocidad ultrasonido para muestras Tipo B

El ensayo de ultrasonidos mide el tiempo que tarda en atravesar un ultrasonido una muestra de material o un elemento constructivo. Además es un indicador a nivel cualitativo de la compacidad de un material, ya que cuanto más tarda en pasar más porosidad tendrá.



Fig. 110. Probetas rotas a compresión



Fig. 111. Probetas ensayadas con Fenolftaleína



Fig. 112. Ensayo de Ultrasonido a probetas

En la tabla 30 puede apreciarse un claro descenso de la velocidad de paso del ultrasonido en las probetas de tierra+residuo respecto las de tierra sola. Con ello podemos afirmar que la aportación de residuo de caucho (polvo y textil) aumenta la porosidad de la masa.

Adherencia

Este ensayo se ha realizado según lo descrito en el apartado 5.2.2.3 (Adherencia). Se han obtenido una resistencia a tracción por cohesión para el panel de sólo tierra, debido a que la tierra ha roto por la unión de sus propias partículas en la base de proyección. Para el panel de Tierra + caucho se ha obtenido una rotura por adhesión, donde se ha separado el material del soporte, sin embargo, no se han podido obtener valores cuantitativos de este ensayo debido, en un principio a la poca sensibilidad de la máquina utilizada, siendo ésta en tal caso $<0.20\text{Kg/cm}^2$, no obstante, los valores de cohesión sin drenaje, obtenidos calculando la mitad del esfuerzo a compresión, para las muestras extraídas de los paneles proyectados, en el caso de sólo Tierra varía entre 1.5 y 2Kg/cm^2 y en Tierra + Caucho 0.38 y 1.15Kg/cm^2 , todos valores mayores a los mínimos de referencia de la máquina, lo que implica la búsqueda de un sistema diferente que permita medir este parámetro, tales como el ensayo por arrancamiento, contemplado en la norma UNE 83-604-94 (Determinación de la resistencia a compresión in situ por medio del ensayo de arrancamiento).



Fig. 113. Sufrideras obtenidas de paneles proyectados

7 CONCLUSIONES

De esta investigación podríamos concluir lo siguiente:

El módulo granulométrico de la tierra base está comprendido entre 3.8 y 4.2, lo que denota una clara similitud con el suelo patrón de Formación Alhambra, con una fracción de gravas inferior al 5% ($>10\text{mm UNE}$) y una fracción de finos entre el 5 y el 8% ($<0.088\text{ UNE}$). Esto hace que este material presente buenas propiedades para ser compactado. Las resistencias mecánicas a compresión, en torno a $37,5\text{ Kg/cm}^2$, también son similares al suelo patrón (Formación Alhambra) e incluso resultados similares en cuanto a la densidad máxima en el ensayo de Proctor normal, 2 g/cm^3 , con una Humedad óptima como valor tipo del 10.5%

El residuo utilizado (Polvo de caucho + Residuo Textil) proveniente de los Neumáticos Fuera de uso, aporta una textura comprendida entre el tamiz 0.63 UNE y el 0.16 UNE. En las mezclas, al ir aumentando los contenidos de residuo entre el 10% y el 30% se aprecia una clara disminución de las

resistencias mecánicas a compresión, oscilando entre el 5.88 Kg/cm² (10% residuo) y 2 Kg/cm² (30% residuo).

La carbonatación conseguida tras siete días en cámara de carbonatación forzada ha sido completa, lo que denota una elevada cantidad de poros, ya que el CO₂ penetra con facilidad hasta el núcleo de las muestras. Aunque la carbonatación ha sido total, al comparar la resistencia mecánica a compresión de estas probetas con sus homólogas en carbonatación natural (carbonatándose solo la parte más externa), se observa que no hay diferencia alguna, es decir, la carbonatación no favorece el aumento de resistencias concluyendo así que en las mezclas con adición de residuo no hay efecto cementante del aglomerante.

Del efecto de la proyección podemos determinar que las mezclas proyectadas son más porosas que las probetas fabricadas en laboratorio con las mismas mezclas. Esto lleva a un claro descenso de las resistencias mecánicas a compresión de las probetas talladas de masa proyectada respecto a las obtenidas en probetas tipo Proctor con Humedad óptima y densidad máxima e incluso las que se realizaron llenando y vibrando en moldes. Tras el secado de la masa aportada se denotó un aumento de la fisuración por retracciones más abundante de la que presenta la tierra proyectada sin este tipo de adición.

La maquinaria de proyección, la revocadora tigre, no parece adecuada para ejecutar revestimientos en obra aunque sí para la investigación en laboratorio ya que los resultados desprenden variaciones relativas, datos cualitativos.

En definitiva, esta investigación abre una línea en la que el caucho puede introducir otras propiedades, como las acústicas y térmicas debidas al aumento de porosidad que incorpora en la masa proyectada. Habrá que seguir comparando la masa aportada con los datos que se conocen de tierra proyectada para dar algunas aplicaciones a este residuo, en principio muy esperanzadoras.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Datos obtenidos de la consejería de agricultura, ganadería, pesca y desarrollo sostenible de la Junta de Andalucía
<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=5d492f287a6ad310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnextchannel=7ff8e9e6e31ad310VgnVCM2000000624e50aRCRD>
- [2] <http://consejointertextil.com/informacion-estadistica-cityc/> (información obtenida de la página general del consejo intertextil)
- [3] Información obtenida por el contacto directo con INDITEX
- [4] Información obtenida de la página <http://reciclario.com.ar/indice/textiles/>
- [5] Definición tomada de : <http://geneu.com.uy/polvo-de-caucho-otras-aplicaciones/>
- [6] Definición obtenida de la página oficial de la empresa
<https://www.signus.es/sobre-signus/>
- [7] Proceso e imágenes aportadas por la empresa.
- [8] Información obtenida de la página oficial de la empresa
<https://www.signus.es/aplicaciones-neumaticos-reciclados/>
- [9] Tesis _ Universidad del bío-bío facultad de arquitectura, construcción y diseño departamento de ciencias de la construcción escuela de ingeniería en construcción
- [10] Tesis _ paneles aislantes de sonido elaborados con concreto y adición de polvo de llanta por Guillermo Antonio Guzmán Arriola
- [11] Caracterización de la compactación de suelos edáficos de la formación alhambra utilizando un estabilizador de enzimas ecológicas en sustitución de cal" investigación publicada por Víctor Ortega Ruiz como Trabajo Fin de Grado de la Escuela Superior de Arquitectura de Granada
- [12] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.4.-Descripción y clasificación de suelos, la cual previene de UNE 103-101, y ha sido estudiada en paralelo
- [13] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.3.- Determinación de la humedad higroscópica
- [14] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.11.-Ensayodecompactación.Proctor normal.UNE103-500-94
- [15] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.19.- Pruebas con fenolftaleína
- [16] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.23.-Ensayo en cámara de carbonatación acelerada
- [17] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 4.3.24.-Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo
- [18] Información obtenida de la página oficial de compra de la Revocadora Tigre. <http://www.revocadorastigre.com/index.html>
- [19] Información obtenida del enlace
https://www.construmatica.com/construpedia/Cal_Hidr%C3%A1ulica
- [20] Información obtenida del enlace
<https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento>
- [21] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010). Apartado 4.1
- [22] Información obtenida de la tesis "Tierra Proyectada" (Fuentes, 2010).. Apartado 5.2. Estudio de las diferentes mezclas. Aproximación a la mezcla óptima.
- [23] Tesis Tierra Proyectada

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1. Datos obtenidos de la página oficial del CITYC
- Fig. 2. Composición y consumo petrolífero de neumáticos. SIGNUS.2015
- Fig. 3 Triturado de neumáticos_ Información tomada de la página de la empresa
- Fig. 4 CHIP de neumáticos_ Información tomada de la página de la empresa
- Fig. 5 Granulado y Polvo de neumáticos_ Información tomada de la página de la empresa
- Fig. 6 Tamaños: POLVO <1 mm; GR1 0,8-2 mm; GR2 2- 4 mm; GR3 4-8 mm_ Información tomada de la página de la empresa
- Fig. 7. Fotografía obtenida de la Tesis de Tierra Proyectada
- Fig. 8. Almacenamiento sacos de 20kg
- Fig. 9. Tamizado mecánico
- Fig. 10. Sacos de residuo aportado por SIGNUS
- Fig. 11. Muestras y probetas en estufa. Secado a 110°C
- Fig. 12. Tamizadora mecánica
- Fig. 13. Granulometría de partículas
- Fig. 14. Grupo de tamices utilizados
- Fig. 15. Instrumentos utilizados para obtención LP Y LL
- Fig. 16. Aparato de Casagrande
- Fig. 17. Cilindro de ensayo Tierra
- Fig. 18. Muestra secada en estufa hasta peso constante
- Fig. 19. Ensayo Proctor normal. Determinación Humedad óptima y densidad máxima
- Fig. 20. Molde usado ensayo proctor
- Fig. 21. Probeta en compactación proctor
- Fig. 22. Probeta con ensayo de fenolftaleína
- Fig. 23. Prueba con Fenolftaleína
- Fig. 24. Cámara de Carbonatación
- Fig. 25. Probeta rota a compresión sólo Tierra
- Fig. 26. Prensa utilizada para ensayos sistema hidráulico
- Fig. 27. Prensa utilizada para ensayos sistema electromecánica
- Fig. 28. Panel Proyectado sólo Tierra
- Fig. 29. 1ra Mezcla obtenida
- Fig. 30. Primera capa
- Fig. 31. 2da Mezcla obtenida
- Fig. 32. Segunda capa
- Fig. 33. 3ra Mezcla obtenida
- Fig. 34. Tercera capa
- Fig. 35. Fibra textil con toda el agua en tambor de mezcla
- Fig. 36 Tabique de ladrillo para proyección
- Fig. 37. Tabique de bloques de hormigón utilizado para prueba de máquina
- Fig. 38. Imagen obtenida de la página oficial de referencia
- Fig. 39. Maquinaria utilizada en la proyección en el laboratorio
- Fig. 40. Soportes con proyecciones. izq sólo Tierra. Drcha Tierra + Residuo
- Fig. 41. Muestras extraídas de la proyección
- Fig. 42. Probetas obtenidas de las muestras extraídas Fig 41
- Fig. 43. Probetas obtenidas de las mezclas proyectadas
- Fig. 44. Probetas ensayadas a compresión
- Fig. 45. Masa aislada durante el proceso de proyección
- Fig. 46. Masa aislada durante el proceso de proyección
- Fig. 47. Adherómetro digital
- Fig. 48. Imagen de laboratorio Tierra + Caucho

Fig. 49. Acopio de Tierra en el laboratorio

Fig. 50. Muestra de Polvo de caucho obtenida después de ensayar granulométricamente

Fig. 51. Muestra NHL-5 en laboratorio

Fig. 52. Muestra BI 1 52.5 Mpa

Fig. 53. Fluidificante utilizado en proyección

Fig. 54. Probetas compactadas con proctor normal de sólo tierra

Fig. 55. Proctor normal sólo Tierra

Fig. 56. Ensayo proctor normal Tierra + caucho en diferentes proporciones

Fig. 57. Probetas Tierra + Caucho + conglomerante

Fig. 58. Cámara de CO₂ condiciones específicas (carbonatación acelerada)

Fig. 59. Granulometría 1 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 60. Granulometría 2 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 61. Granulometría 3 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 62. Granulometría 4 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 63. Proctor Normal 1 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 64. Proctor Normal 2 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 65. Proctor Normal 3 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 66. Proctor Normal 4 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 67. Resistencia a compresión 1 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 68. Resistencia a compresión 2 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 69. Resistencia a compresión 3 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 70. Resistencia a compresión 4 (Fuentes, R. 2010)

Fig. 71. Granulometría Sólo Tierra

Fig. 72. Gráfico granulometría sólo Tierra

Fig. 73. Granulometría Polvo de caucho

Fig. 74. Gráfico granulometría Polvo de Caucho

Fig. 75. Granulometría caucho + Textil

Fig. 76. Gráfico granulometría Polvo de Caucho + Textil

Fig. 77. Cuchara CASAGRANDE

Fig. 78 Gráfico Representación Proctor Normal Sólo Tierra

Fig. 79. Realización. Proctor Normal Sólo Tierra

Fig. 80. Obtención muestras. Proctor Normal Sólo Tierra

Fig. 81 Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 5% Residuo

Fig. 82. Realización. Proctor Normal Tierra + 5% Residuo

Fig. 83. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 5% Residuo

Fig. 84 Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 10% Residuo

Fig. 85. Realización. Proctor Normal Tierra + 10% Residuo

Fig. 86. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 10% Residuo

Fig. 87 Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 15% Residuo

Fig. 88. Realización. Proctor Normal Tierra + 15% Residuo

Fig. 89. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 15% Residuo

Fig. 90. Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 20% Residuo

Fig. 91. Realización. Proctor Normal Tierra + 20% Residuo

Fig. 92. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 20% Residuo

Fig. 93. Gráfico Representación Proctor Normal Tierra+ 30% Residuo

Fig. 94. Realización. Proctor Normal Tierra + 20% Residuo

Fig. 95. Obtención muestras. Proctor Normal Tierra + 30% Residuo

Fig. 96. Muestras ensayo proctor según diferentes proporciones

Fig. 97. Gráfico Humedad- Resistencia a compresión. Sólo Tierra

Fig. 98. Probetas Resistencia a compresión Tierra + Residuo

Fig. 99. Gráfico comparación Tierra + Residuo

Fig. 100. 10% sin carbonatación
 Fig. 101. 10% con Cámara de carbonatación
 Fig. 102. 20% sin carbonatación
 Fig. 103. 20% con Cámara de carbonatación
 Fig. 104. 30% sin carbonatación
 Fig. 105. 30% con Cámara de carbonatación
 Fig. 106. Probetas obtenidas del revestimiento ensayadas a compresión
 Fig. 107. Comparación a compresión probetas extraídas del soporte
 Fig. 108. Probetas MUESTRA TIPO B
 Fig. 109. Comparación a compresión probetas encofradas en moldes
 Fig. 110. Probetas rotas a compresión
 Fig. 111. Probetas ensayadas con Fenolftaleína
 Fig. 112. Ensayo de Ultrasonido a probetas
 Fig. 113. Sufrideras obtenidas de paneles proyectados

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Obtenida de la consejería de agricultura, ganadería, pesca y desarrollo sostenible de la Junta de Andalucía
 Tabla 2. Resumen densidad máxima y Humedad óptima para diferentes proporciones de Tierra + Caucho
 Tabla 3. Dosificaciones finales TIERRA + CAUCHO+ AGLOMERANTES+AGUA
 Tabla 4. Clasificación del suelo según muestras de referencia (Fuentes, R. 2010)
 Tabla 5. Ensayo de higroscopicidad en las muestras de referencia (Fuentes, R. 2010)
 Tabla 6. Comparación Granulometría sólo Tierra con Tesis Tierra Proyectada
 Tabla 7. Comparación Granulometría TIERRA – POLVO DE CAUCHO –POLVO DE CAUCHO+TEXTIL
 Tabla 8. Ensayos para obtención del LL de muestra 1
 Tabla 9. Ensayos para obtención del LL de muestra 2
 Tabla 10. Ensayos para obtención del LP
 Tabla 11. Comparación Humedad Higroscópica sólo Tierra con Tesis Tierra Proyectada
 Tabla 12. Proctor Normal sólo Tierra_ Densidad Seca
 Tabla 13. Proctor Normal sólo Tierra_ Humedad
 Tabla 14. Comparación Proctor normal. Tierra Base- Tesis Tierra Proyectada
 Tabla 15. Proctor Normal Tierra+5% Residuo_ Densidad Seca
 Tabla 16. Proctor Normal Tierra+ 5% Residuo_ Humedad
 Tabla 17. Proctor Normal Tierra+10% Residuo_ Densidad Seca
 Tabla 18. Proctor Normal Tierra+ 10% Residuo_ Humedad
 Tabla 19. Proctor Normal Tierra+15% Residuo_ Densidad Seca
 Tabla 20. Proctor Normal Tierra+ 15% Residuo_ Humedad
 Tabla 21. Proctor Normal Tierra+20% Residuo_ Densidad Seca
 Tabla 22. Proctor Normal Tierra+ 20% Residuo_ Humedad
 Tabla 23. Proctor Normal Tierra+30% Residuo_ Densidad Seca
 Tabla 24. Proctor Normal Tierra+ 30% Residuo_ Humedad
 Tabla 25. Comparación según proporciones residuo-Resistencia a compresión simple
 Tabla 27. Comparación. Resistencia a compresión Tierra + Residuo
 Tabla 28. Comparación. Resistencia a compresión probetas extraídas soporte Sólo Tierra (Tierra 1, Tierra 2, Tierra 3) y Tierra + Residuo (Tierra + Res1, Tierra + Res2, Tierra + Res3)
 Tabla 29. Comparación Resistencia a compresión
 Tabla 30. Velocidad ultrasonido para muestras Tipo B